Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина
Физико-технологический институт

ФИЗИКА ТЕХНОЛОГИИ ИННОВАЦИИ

Сборник статей VIII Международной молодежной научной конференции

г. Екатеринбург
17 - 21 мая 2021 г.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина

ФИЗИКА
ТЕХНОЛОГИИ
ИННОВАЦИИ

Сборник статей
VIII Международной молодежной научной конференции

(Екатеринбург, 17 – 21 мая 2021 г.)

Екатеринбург
2021

УДК 53:62:001.895(063)
ББК 22.3я431+30я431+65-55я431
Ф 48

Научные редакторы:
старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук,
директор физико-технологического института ФГАОУ ВО «Уральский федеральный
университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина»
В. Ю. Иванов
доцент, кандидат физико-математических наук, заместитель директора по общим вопросам
ФТИ ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина»
Д. Р. Байтимиров
нач отдела организации учебной работы Физико-технологического института
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина»
Е. Д. Нархов
кандидат физико-математических наук, доцент физико-технологического института ФГАОУ
ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина»
Д. М. Спиридонов

Физика. Технологии. Инновации : сборник статей VIII Международной молодежной научной конференции (Екатеринбург, 17–21 мая 2021 г.) / под редакцией В. Ю. Иванова, Д. Р. Байтимирова , Е. Д. Нархова, Д. М. Спиридонова; Министерство образования и науки РФ, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург: УрФУ, 2021. – 539 с. – Текст: электронный.

Сборник статей VII Международной молодежной научной конференции «Физика. Технологии. Инновации» раскрывает актуальные проблемы современной физики, инновационных и информационных технологий, а также социальных наук. Здесь объединены результаты научного анализа и эмпирических исследований, представленных известными учеными, ведущими специалистами и молодыми исследователями. Сборник будет интересен научным деятелям и практикующим специалистам в области физики, химии, информационных технологий, филологии, социологии, истории, экологии.

УДК 53:62:001.895(063)
ББК 22.3я431+30я431+65-55я431

© Уральский федеральный университет, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Жарков Г.В., Бабенко А.А., Бахрачева Ю.С.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ В ГОСУДАРСТВЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ 10

Абакумова Е.В., Галишева А.О., Тарасова Н.А., Анимица И.Е.

СИНТЕЗ И ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА $BaLaIn_{1-x}Sc_xO_4$ (x = 0; 1) 17

Ахмадиева А.А., Кахидзе Н.И., Хрусталёв А.П., Жуков И.А.

ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ AL2O3 НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО АЛЮМИНИЯ МАРКИ А0 ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ ДЕФОРМАЦИИ 25

Аладаилах М.В., Ширманов И.А., Стругов Е.Д., Ташлыков О.Л., Эке К., Илдырым А.

ОЦЕНКА РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ Y_2O_3-MnO_2-Al_2O_3-SiO_2-CaO С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ PHY-X И ИМИТАЦИОННОГО КОДА GEANT4 36

Бессонов И.А., Чалпанов С.В., Лезов А.Д., Ташлыков О.Л., Климова В.А., Морданов С.В., Хомяков А.П., Ремез В.П.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОРБЕНТОВ ДЛЯ ИОНОСЕЛЕКТИВНОЙ ОЧИСТКИ 46

Бородин К. И., Волков В. А.

ВЛИЯНИЕ НЕИЗОЭЛЕКТРОННОСТИ КОМПОНЕНТОВ НА ЗАВИСИМОСТЬ ОСТАТОЧНОГО ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ БИНАРНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ ОТ СОСТАВА 59

Бородин Н.Д., Данилов Д.А., Киселева Д.В., Шиловский О.П

ЖИРОКИСЛОТНЫЙ СОСТАВ ФОССИЛИЙ ИЗ ПЕРМСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ МЕТОДОМ ГХ/МС 69

Бортникова К.С., Спиридонов Д.М.

ОБЗОР МЕТОДОВ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ НА ПРИМЕРЕ СМК. 77

Черных С. Е., Костин В. Н., Комоликов Ю. И.

ТЕПЛОВОЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ПОРИСТЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ 88

Журавлев Д.В., Ищенко Е.А., Фёдоров С.М.

НИЗКОПРОФИЛЬНАЯ ЩЕЛЕВАЯ АНТЕННА
ИНТЕГРИРОВАННАЯ С СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛЬЮ 99

Гаранина Е.В., Белых Т.А.

УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ КАЛИБРОВОЧНОЙ ЛАБОРАТОРИИ
КАК ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД К МЕНЕДЖМЕНТУ
КОМПАНИИ ООО «WEATHERFORD» 105

Глухов С.М., Лёзов А.Д., Шумков Д.Е., Климова В.А., Ташлыков О.Л.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПАССИВНОГО ОТВОДА ТЕПЛА
ОТ ШАХТЫ-ХРАНИЛИЩА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО
РЕАКТОРА ИВВ-2М ПРИ ПОМОЩИ ТЕРМОСИФОНОВ 113

Жихарев А.М., Ищенко Е.А., Фёдоров С.М., Кузнецова В.В.

ДВУХДИАПАЗОННАЯ ЩЕЛЕВАЯ MIMO АНТЕННА
ДЛЯ СОТОВОГО ТЕЛЕФОНА 123

Хейнштейн В.Я., Никифоров С.В., Фатина Ж.Е.

РАЗРАБОТКА ТИПОВОГО СВИДЕТЕЛЬСТВА НА АТТЕСТОВАННЫЕ
ОБЪЕКТЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ОБЛАСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ 131

Кривенок Д.А., Данилов С.В., Никульченков Н.Н., Лобанов М.Л.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ
КОНТРОЛИРУЕМОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ 139

Ладвищенко А.А., Лагунов А.Ю.

РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ 148

Лисовенко А.С., Лимановская О.В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ОСНОВЕ УЧЕТА ДЕФЕКТНОСТИ
ПРОВОДОВ И УСЛОВИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ 157

Лукашов А.С., Вдовкин В.А., Трофимова Е.С., Пустоваров В.А.

ПРОГРАММНАЯ И АППАРАТНАЯ МОДЕРНИЗАЦИЯ
КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКОЙ
ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТОЙ СПЕКТРОСКОПИИ 169

Макарова И.Е., Спиридонов Д.М.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТАРОЙ И НОВОЙ
ВЕРСИЙ ГОСТ Р ИСО 31000 180

Мартемьянов Н.А., Ильяшенко И.Н., Байнов И.Н., Камалов Р.В., Вохминцев А.С., Вайнштейн И.А.

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ТЕРМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НА СТРУКТУРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА g-C_3N_4 189

Миронов А.А., Хохлов К.О.

БЛОК ПИТАНИЯ ДЛЯ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОСПИННИНГА 198

Молоднякова А.В.

РАЗВИТИЕ ОБЪЕМНО-ПРОСТРАНСТВЕННОГО МЫШЛЕНИЯ ДЕТЕЙ СТАРШЕГО ДОШКОЛЬНОГО ВОЗРАСТА В УСЛОВИЯХ КОМПЬЮТЕРНО-ИГРОВОГО КОМПЛЕКСА «LIGROGAME» 207

Морданов С.В., Ташлыков О.Л., Хомяков А.П., Ремез В.П., Бессонов И.А., Чалпанов С.В.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СОРБЕНТОВ ДЛЯ ИОНОСЕЛЕКТИВНОЙ ОЧИСТКИ ЖРО..... 216

Морозов Я.О., Жижина У.В., Каграманов Ю.А., Рыжков А.Ф., Тупоногов В.Г.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКТОРА ТВЕРДОСОРБЕНТНОЙ СЕРООЧИСТКИ СИНТЕЗ-ГАЗА 231

Никитенко Е.И., Ромадов Н.Н., Кружалов А.В., Екидин А.А.

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ПРОБ ГАЗООБРАЗНЫХ ВЫБРОСОВ ПРОМЫШЛЕННОЙ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДНОГО СОСТАВА .. 245

Рыбалко С.В., Рыбалко В.Г., Новгородов Д.В. Сурков А.Ю., Губанов Я.В.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРИ РЕМОНТЕ УЧАСТКОВ ГАЗОПРОВОДОВ, СОДЕРЖАЩИХ ДЕФЕКТЫ КРН ГЛУБИНОЙ ДО 10% СТЕНКИ ТРУБЫ .. 253

Карякина О.Е., Карякин А.А., Оруджова О.Н.

ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ОЦЕНКИ СТРУКТУРНО – ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СЕРДЦА У ДЕТЕЙ ПЕРВОГО ГОДА ЖИЗНИ 260

Князева А. Г., Овчинников Е. Н

ИНИЦИИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ В ПОЛУПРОЗРАЧНОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ МАТЕРИАЛЕ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ СОПРЯЖЕННОГО ТЕПЛООБМЕНА 269

Патраков В.Е., Лисовский Д.А.

МОЩНЫЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ГЕНЕРАТОР НА ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ 280

Рыбалко В.Г., Новгородов Д.В., Сурков А.Ю., Рогова Е.А.

ФРАКТОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ..... 291

Ширманов И.А., Стругов Е.Д., Аладаилах М.В., Ташлыков О.Л., Абиалсаид М.И., Аскин А.

ОЦЕНКА ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ СТЕКОЛ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОКСИДА ГОЛЬМИЯ ОТ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ 298

Шлеенков А.С. , Новгородов Д.В. , Коновальчук .В.О.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ ПРОДОЛЬНОГО СВАРНОГО ШВА ТРУБЫ 307

Шумков Д.Е., Ташлыков О.Л., Глухов С.М.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ В ШАХТЕ-ХРАНИЛИЩЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ИВВ-2М..... 315

Стругов Е.Д., Ширманов И.А., Аладаилах М.В., Ташлыков О.Л., Аль-Буриахи М.С.

ОЦЕНКА ЭКРАНИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СТЕКЛЯННОЙ СИСТЕМЫ Na_2O-B_2O_3-Bi_2O_3-MoO_3 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОДА GEANT4 И БАЗЫ ДАННЫХ XCOM..... 324

Ступин С.А., Огородникова О.М.

ПРОЕКТ БИОНИЧЕСКОГО ЗАХВАТНОГО УСТРОЙСТВА РОБОТА ДЛЯ СБОРА УРОЖАЯ..... 333

Султанова Т.Р., Вазиров Р.А., Улитко М.В., Соковнин С.Ю.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАНОЧАСТИЦ ДИОКСИДА ЦЕРИЯ НА РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЛИМФОСАРКОМЫ 343

Та Ван Тхыонг, Ташлыков О. Л., Фам Хак Туйен, Ву Хоанг Хай

РАЗРАБОТКА РУКОВОДСТВА ПО ПОДГОТОВКЕ ОТЧЕТА ОБ ОЦЕНКЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ДЛЯ ЦЕНТРА ЯДЕРНОЙ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ ВЬЕТНАМА 353

Валихов В.Д., Кахидзе Н.И, Ахмадиева А.А., Мубараков Р.Г.

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ, УПРОЧНЁННОГО БАЗАЛЬТОВЫМИ ВОЛОКНАМИ 365

Эстемирова С.Х., Митрофанов В.Я., Черепанова Л.А.

СТРУКТУРНЫЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДОГО РАСТВОРА $TM_{2-X}MN_XO_3$ С ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ 374

Сун. Г., Решетникова О.Е., Дайнеко Л.В.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫНУЖДЕННОГО ПЕРЕХОДА НА ДИСТАНЦИОННОЕ ОБУЧЕНИЕ ГЛАЗАМИ СТУДЕНТОВ 384

Ермакова Н.Н., Семенов Е.С.

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ СОЗДАНИЯ ГОЛОСОВОГО РОБОТА 393

Гаврилова Т.О., Белых Т.А., Бородин К.И.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОТИВАЦИИ ПЕРСОНАЛА К РАЦИОНАЛИЗАТОРСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ 402

Карташова Е.С., Данилов Д.А., Половов И.Б.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ КИСЛОРОДА В СМЕСИ ФТОРИДОВ ЛИТИЯ И БЕРИЛЛИЯ 409

Кириченко В.А., Токманцев В.И.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОВЫХ ТЕЧЕНИЙ В МОЛЕКУЛЯРНОМ НАСОСЕ ХОЛЬВЕКА 418

Литовченко В.Ю., Васютин Н.А., Ташлыков О.Л., Козлов Ан.В., Селезнев Е.Н.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ КОНТЕЙНЕРОВ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ КОНДИЦИОНИРОВАННЫХ ЖИДКИХ ОТХОДОВ 426

Литвинов Д.Н., Костарев В.С., Ширманов И.А., Щеклеин С.Е., Мищихин А.А.

МАЛОГАБАРИТНАЯ АЭС МАЛОЙ МОЩНОСТИ С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ ДЛЯ АРКТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ 438

Шалина Д.С., Степанова Н.Р.

AGILE ПОДХОД В ПРОЦЕССЕ КОММЕРЦИАЛИЗАЦИИ ИННОВАЦИОННЫХ РАЗРАБОТОК 453

Туйков А.С., Сюрдо А.И., Абашев Р.М., Краснопёров В.С., Мильман И.И.

СПЕКТРАЛЬНОЕ И ВРЕМЕННОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ СИГНАЛОВ ОПТИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ И ОПТИЧЕСКИ СТИМУЛИРОВАННОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В АНИОНОДЕФЕКТНОМ КОРУНДЕ 462

Вараксин А.В., Петрова С.А., Ремпель А.А.

СИНТЕЗ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО КАРБИДА ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ В СОЛЕВОМ РАСПЛАВЕ 469

Кинева Д.А., Долгий Ю.Ф., Сесекин А.Н., Ташлыков О.Л.

ОПТИМАЛЬНЫЙ ПО ВРЕМЕНИ АЛГОРИТМ НАВЕДЕНИЯ МЕХАНИЗМА ПЕРЕГРУЗКИ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА В РЕАКТОРАХ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ 474

Костарев В. С., Ширманов И. А., Литвинов Д. Н., Щеклеин С. Е.

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕАКТОРА ВВЭР-1200 ПРИ ПОМОЩИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ 484

Масленников Г.Е., Симанов Н.А., Рыжков А.Ф.

ПГУ-ТЭЦ С ПОНИЖЕННЫМ УГЛЕРОДНЫМ СЛЕДОМ 493

Аристов Н. М., Васютин Н. А., Литовченко В. Ю., Ташлыков О. Л.

ОБЛУЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ С ЛИТИЙСОДЕРЖАЩИМИ КЕРАМИКАМИ И БЕРИЛЛИЙСОДЕРЖАЩИМИ СПЛАВАМИ В РЕАКТОРЕ ИВВ-2М ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КИНЕТИКИ ВЫХОДА ТРИТИЯ .. 506

Хариноева Т. А., Мартынов И. Л., Баранова А. А., Вербицкий Е. В., Чистяков А. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОСТАБИЛЬНОСТИ ОРГАНИЧЕСКИХ ЛЮМИНОФОРОВ В МИКРОРЕЗОНАТОРАХ ИЗ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ 516

Розаненков И. Э., Потеряев С. Н., Сивинских И. А., Ташлыков О. Л.

3-D МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ КОМПЛЕКСА ПО ПЕРЕРАБОТКЕ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ 528

УДК 004.056

Жарков Г.В., Бабенко А.А., Бахрачева Ю.С.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ В ГОСУДАРСТВЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Аннотация. В статье рассматривается проблема определения состава системы защиты информации в государственных информационных системах. Разработаны этапы алгоритма, функциональная модель и программный комплекс для определения состава системы защиты информации.

Ключевые слова: защищенность, государственные информационные системы, состав системы защиты информации.

Abstract. The article deals with the problem of determining the composition of the information protection system in state information systems. The stages of the algorithm, a functional model and a software package for determining the composition of the information security system have been developed.

Keywords: security, state information systems, the composition of the information protection system.

Введение

Анализ ГИС, зарегистрированных в Реестре Федеральных ГИС, показал, что в них обрабатывается информация с ограничительной пометкой «для служебного пользования», персональные данные, а также содержатся сегменты, в которых размещаются сайты государственных органов – то есть СОП. Если в ГИС обрабатывается информация ограниченного доступа, то определение класса защищенности регламентируется Приказом ФСТЭК России от 11 февраля 2013 г. № 17 [1], если на базе ГИС развернут сервер государственного или муниципального органа, то классификацию ГИС производит оператор.

По степени конфиденциальности информацию, обрабатываемую в ГИС, делят на:

– особой важности (ОВ);
– совершенно секретную (СС);
– секретную (С);
– конфиденциальную.

Обеспечение безопасности информации и устойчивого функционирования государственных информационных систем начинается с определения класса защищенности информационной системы, согласно [1]. Класс защищенности зависит от масштаба информационной системы (федеральный, региональный, объектовый) и уровня значимости информации. Уровень значимости определяется

степенью возможного ущерба для обладателя информации по таким показателям, как конфиденциальность, целостность и доступность. В зависимости от класса защищенности определяется базовый набор мер защиты информации, содержащийся в приложении 2 [1]. Базовый набор мер защиты проходит несколько стадий доработки, а именно, адаптацию, включающую в себя изменение состава базового набора мер защиты в зависимости от структурно-функциональных особенностей информационной системы. Затем адаптированный базовый набор проходит этап уточнения, основанный на блокировании всех угроз информационной безопасности на основе заранее разработанной модели угроз. На заключительном этапе проводится дополнение уточненного адаптированного базового набора мер основанное на выполнении требований о защите информации иных нормативных правовых актов. В данной статье рассматривается определение состава системы защиты информации на этапе уточнения адаптированного базового набора мер защиты информации.

Существуют различные классификации мер защиты информации в ИС. Регулятором установлены следующие меры защиты информации в ГИС:

1) идентификация и аутентификация субъектов доступа и объектов доступа;
2) управление доступом субъектов доступа к объектам доступа;
3) ограничение программной среды;
4) защиту машинных носителей информации;
5) регистрация событий безопасности;
6) антивирусная защита (АВЗ);
7) обнаружение (предотвращение) вторжений;
8) контроль (анализ) защищенности информации;
9) целостность информационной системы и информации;
10) доступность информации;
11) защита среды виртуализации;
12) защита технических средств;
13) защита информационной системы, ее средств, систем связи и передачи данных.

Для ГИС технические меры защиты информации реализуются посредством применения СЗИ, в том числе программных (программно-аппаратных) средств, в которых они реализованы, имеющих необходимые функции безопасности.

Образцы и методика эксперимента

Функциональная модель выбора наиболее эффективного состава системы защиты информации в государственной информационной системе представлен на рисунке 1.

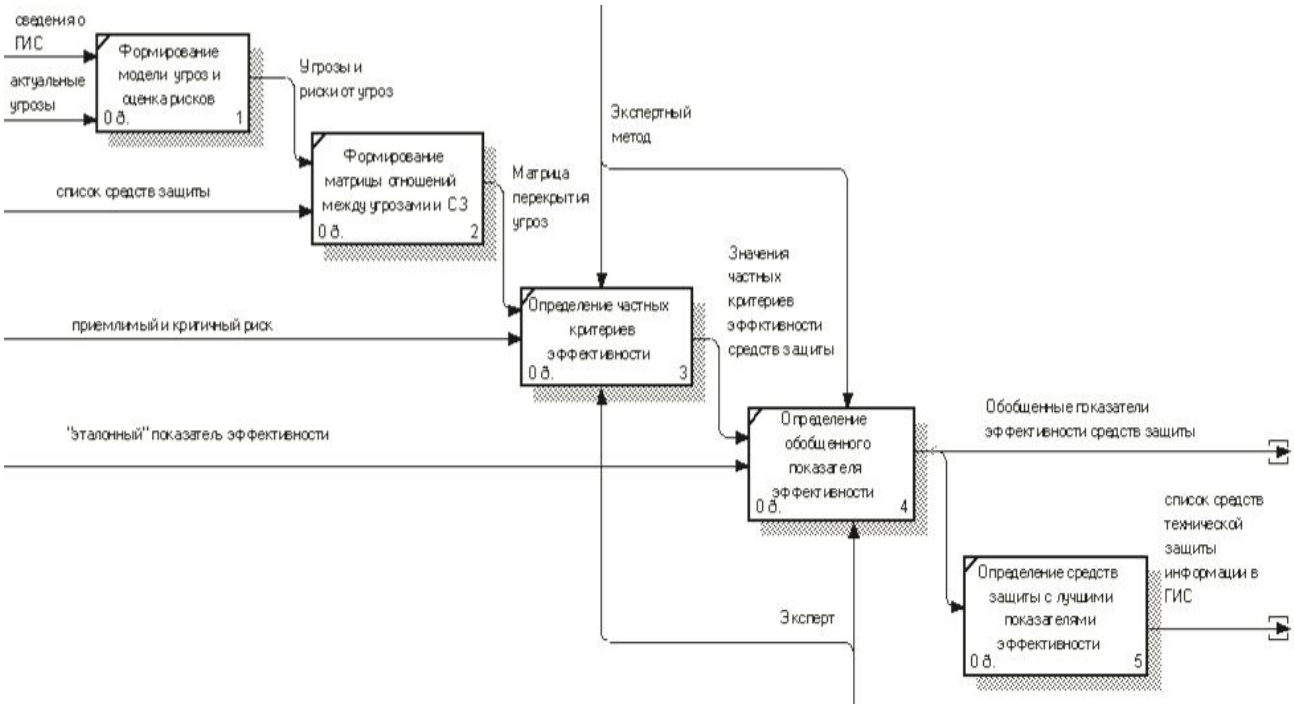


Рисунок 1 – Функциональная модель выбора модель выбора наиболее эффективного состава системы защиты информации в государственной информационной системе

Декомпозиция функциональной модели выбора наиболее эффективного состава системы защиты информации в государственной информационной системе состоит из пяти основных блоков.

1. Формирование модели угроз и оценка. Данный процесс основан на внесении экспертом входных данных, таких как сведения о ГИС, включающие в себя информацию об компонентах информационной системы и информации, обрабатываемой в ГИС; актуальные угрозы информационной безопасности, заранее определенные экспертом, на основе информации об информационной системе и банке угроз ФСТЭК. В результате работы данного блока формируется модель угроз информационной безопасности для рассматриваемой государственной информационной системы.

2. Формирование матрицы отношений между угрозами и средствами защиты информации. На данном этапе на основе данных о существующих средствах защиты формируется матрица перекрытия угроз определенными средствами защиты.

3. Определение частных критериев эффективности. Данный блок предназначен для эффективной оценки средств защиты информации. Оценки

формируются на основе частных критериев, которые основываются как на эффективности, так и на стоимости средств защиты. В результате анализа формируется таблица частных критериев эффективности средств защиты информации, которая послужит для дальнейшего анализа.

4. Определение обобщенного показателя эффективности. На данном этапе на основе информации, полученной из предыдущего блока, и так называемой эвклидовой метрикой. В результате работы данного блока формируются обобщенные оценки средств защиты информации, с помощью которых эксперт выбирает наиболее эффективные средства защиты для рассматриваемой государственной информационной системы.

5. Определение средств с лучшими показателями эффективности. На основе данных, в которые входят активы ГИС, угрозы, соответствующие этим активам, а также возможные средства защиты от данных угроз, экспертом принимается заключительное решение по выбору средств защиты информации. На данном этапе эксперт может произвести фильтрацию угроз безопасности информации на основе приемлемого риска.

Данная функциональная модель выбора наиболее эффективных средств защиты информации получила свою интерпретацию в виде программного средства «Определение состава ТЗИ в ГИС» (свидетельство о государственной регистрации программы №2020615502 от 25 мая 2020 г.). Далее будет рассмотрен подробный алгоритм работы программного средства.

На начальном этапе алгоритма происходит сбор сведений об информационной системе: наименование государственной информационной системы, сведения о наличии в информационной системе информации ограниченного доступа, сведения о возможности использования информационно-телекоммуникационных сетей в рамках функционирования информационной системы. Определяется перечень активов информационной системы и ценность каждого актива, пример изображен на рисунке 2.

Далее формируется модель актуальных угроз для каждого актива, вероятности возникновения и возможного ущерба таких угроз.

Для следующего этапа необходимо применение экспертного метода для формирования матрицы отношения между актуальными угрозами и техническими средствами защиты информации, перекрывающими эти угрозы. Стоит отметить, что в условиях динамичного развития информационного общества, когда происходят кардинальные изменения в технике, в информационных технологиях и в других областях эффективность применения статистических методов для прогнозирования и планирования, особенно на длительный период, снижается. Лица, принимающие решения, могут чрезмерно полагаться на статистические методы и на полученные на их основе результаты и поэтому могут не заметить существенных изменений, значение которых мог бы оценить другой специалист. В таких условиях особую роль в определения

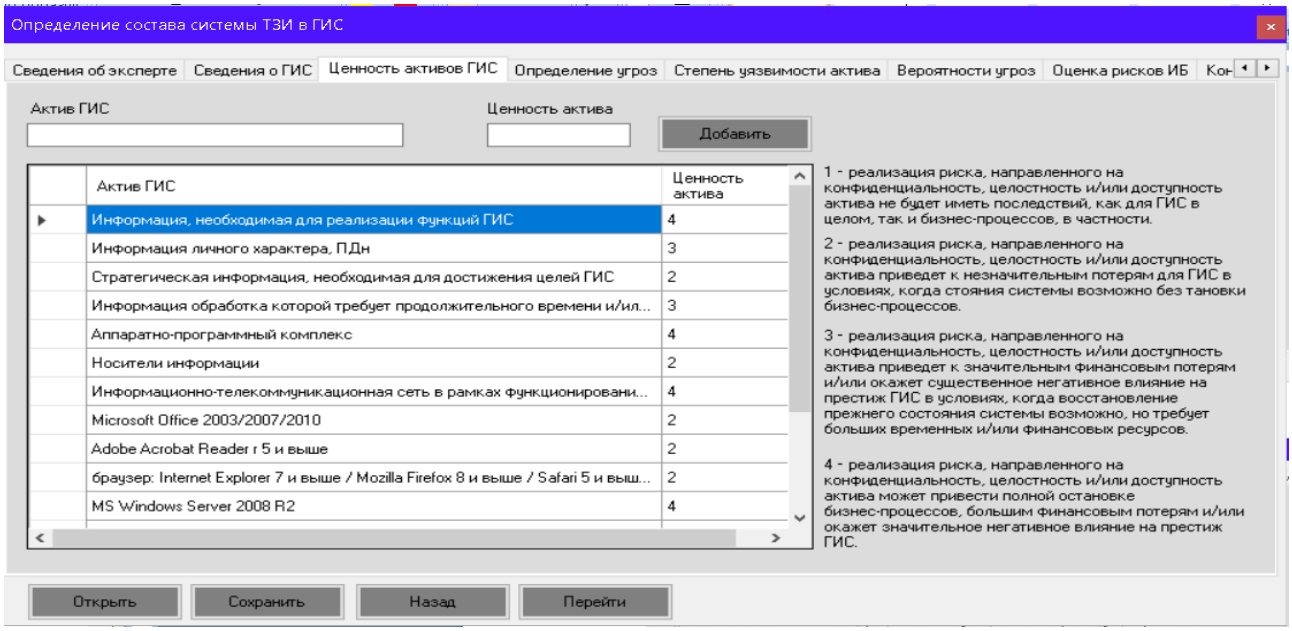


Рисунок 2 – Определение перечня активов
государственной информационной системы

состава системы технической защиты информации в государственных информационных системах приобретает интуиция специалистов, называемых экспертами и используемые при этом экспертные методы.

На следующем этапе происходит оценка технических средств защиты информации на основе таких показателей, как срок действия сертификата ФСТЭК/ФСБ, многофункциональность, контроль на отсутствие недекларированных возможностей и стоимость. Опишем подробнее каждый из этих критериев. Например, критерий срок действия сертификата ФСТЭК/ФСБ определяет насколько долго возможно эксплуатировать средство защиты без необходимости реконструкции информационной системы. Критерий многофункциональность подразумевает под собой выполнение средством защиты нескольких функций защиты, иначе говоря, этот критерий определяет способность средства защиты реализовать несколько мер защиты в соответствии с законодательством. Критерий стоимости определяется отношением средней стоимости средства защиты в группе и рассматриваемым, в случае если стоимость рассматриваемого средства защиты является выше средней, то в этом случае присваивается критерий высокий, иначе низкий. В заключение к данному этапу, стоит отметить, что в основе определения значений критериев лежит экспертный метод.

После определения значения критериев каждого технического средства эксперт может увидеть обобщенный показатель эффективности каждого средства защиты информации и определить наиболее рациональное.

Результаты и обсуждение

В результате на заключительном этапе происходит на основе полученных данных об государственной информационной системе, сформированной модели актуальных угроз и проведенного анализа технических средств защиты информации происходит формирование наиболее рационального состава системы защиты информации в государственной информационной системе. Для примера возьмем актив «Информация, необходимая для реализации функций ГИС». Эксперт установил, что допустимый уровень рисков равен 20, следовательно, риски с числовым значением выше 20 подлежали обработке с целью их минимизации. Для этого эксперт определил контрмеры и технические средства защиты для их реализации. После обработки рисков ИБ, остаточный риск стал приемлемым для каждой из актуальных угроз информационной безопасности ценным активам ГИС. На рисунке 3 представлен результат данного анализа, черным цветом помечены риски информационной безопасности до принятия контрмер, а серым после.

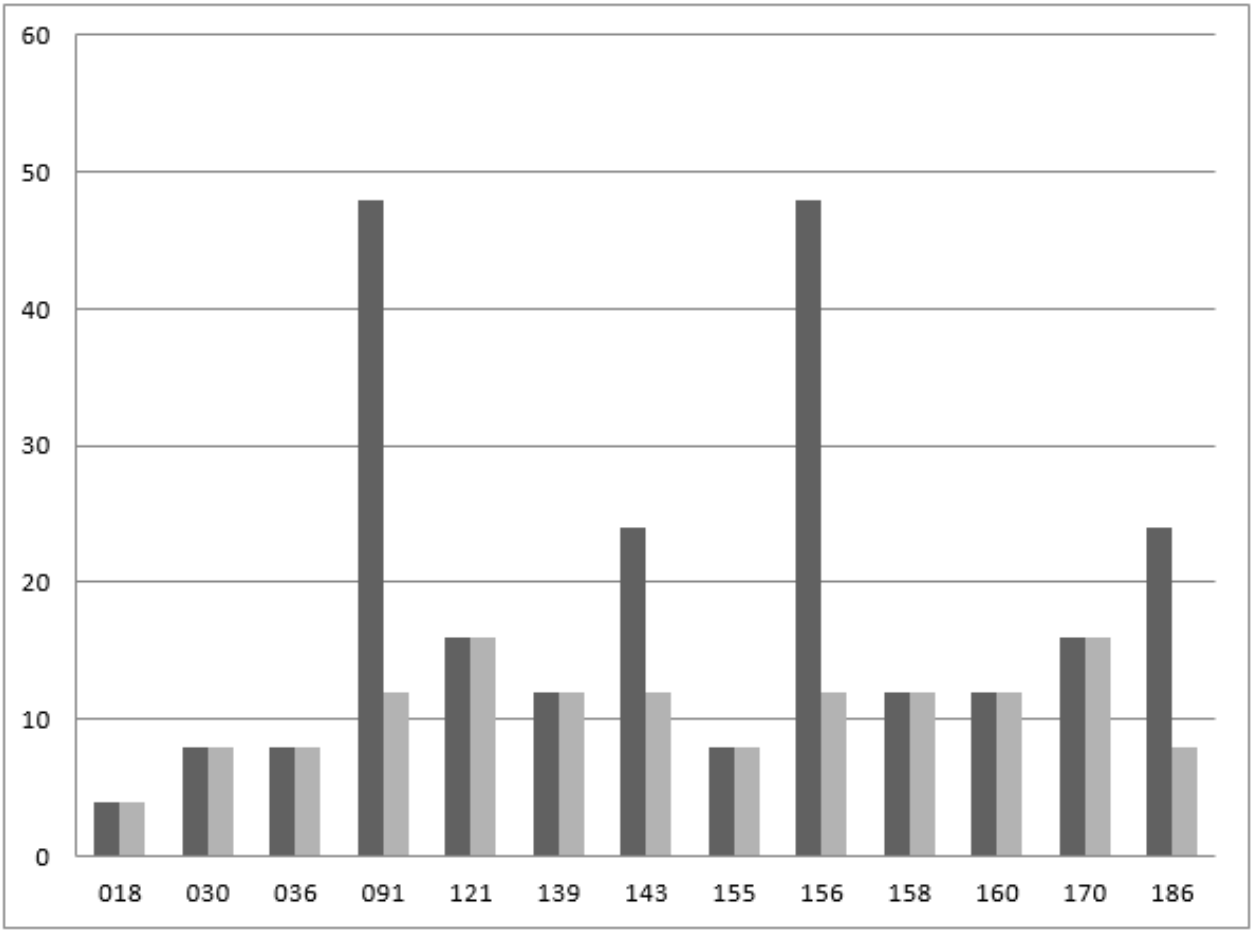


Рисунок 3 – Результаты оценки рисков ИБ актива «Информация, необходимая для реализации функций ГИС». По оси X – номера угроз, по оси Y – уровень риска.

Заключение

Определение состава системы защиты информации в государственной информационной системе является непростой задачей и требуется большого количество времени эксперта для ее решения. Разработанный программный комплекс предназначен для частичной автоматизации и упрощения работы эксперта.

Библиографический список

1. Бабенко А. А. Программа определение состава системы технической защиты информации в государственных системах : свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ № 2020615502 Рос. Федерация : регистрация от 25.05.2020 / А. А. Бабенко, Г. В. Жарков. – Москва, 2020. – 3 с.
2. Витенбург Е. А. Выбор элементов комплекса защиты информационной системы предприятия на основе требований нормативно-правовых документов / Е. А. Витенбург, А. А. Левцова // Вестник Донского государственного технического университета. – 2018. – Вып. 3, № 18. – С. 333–338.
3. Бочкарёва Т. О. Обеспечение защиты информации ограниченного доступа, содержащейся в государственных информационных системах / Т. О. Бочкарёва // III Международный Пенитенциарный форум «Преступление, наказание, исправление» : сб. тез. док. Междунар. науч.-практ. конф. (Рязань, 21–23 нояб. 2017 г.) / Акад. ФСИН России. – Москва, 2017. – С. 363–366.
4. Об утверждении требований о защите информации, не составляющей государственную тайну, содержащейся в государственных информационных системах : приказ № 17 : принят ФСТЭК 11 февраля 2013 года. – URL: https://fstec.ru/normotvorcheskaya/akty/53-prikazy/702 (дата обращения: 13.01.2021).
5. Об информации, информационных технологиях и о защите информации : Федер. закон № 149–ФЗ : одобрен 27 июля 2006 г. – URL: http://fstec.ru/component/attachments/download/277 (дата обращения: 13.01.2021).
6. Меры защиты информации в государственных информационных системах : метод. рек. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_159975 (дата обращения: 23.01.2021).
7. Банк данных угроз безопасности информации // Федеральная служба по техническому и экспортному контролю : сайт. – URL: https://bdu.fstec.ru (дата обращения: 17.01.2021).
8. Государственный реестр сертифицированных средств защиты информации : сайт. – Москва, 2021. – URL: https://fstec.ru/tekhnicheskaya-zaschita-informatsii/dokymenty-po-sertifickatsii/153-sistemasertifikatsii/591 (дата обращения: 17.12.2020).

УДК 537.5:549.641

Абакумова Е.В., Галишева А.О., Тарасова Н.А., Анимица И.Е.

СИНТЕЗ И ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА $BaLaIn_{1-x}Sc_xO_4$ (x = 0; 1)

Аннотация. Методом твердофазного синтеза были получены сложные оксиды $BaLaInO_4$ и $BaLaScO_4$, проведена их аттестация методом порошковой рентгеновской дифракции. Показано, что исследуемые образцы имеют блочно-слоевую структуру Раддлесдена-Поппера. Получены температурные зависимости электропроводности в атмосфере сухого воздуха и сухого аргона и выполнено их сравнение для исследуемых образцов. Установлено влияние природы катиона на долю кислородно-ионного переноса в образцах.

Ключевые слова: сложный оксид, кислородно-ионная проводимость, структура Раддслесдена-Поппера

Abstract. Complex oxides $BaLaInO_4$ and $BaLaScO_4$ were synthesized by the solid state method. Obtained samples were certificated by the powder X-ray diffraction. It was shown that the both samples have a Ruddlesden-Popper block-layer structure. The temperature dependences of electrical conductivity in a dry air and dry argon atmosphere were obtained and compared for the investigated samples. The effect of the nature of cation on the share of oxygen-ionic were established.

Keywords: complex oxide, oxygen-ionic conductivity, Ruddslesden-Popper structure

Введение

Сложные оксиды с ионной проводимостью интересны своими физическо-химическими свойствами [1]. Эти соединения характеризуются различными типами структур, что приводит к значительному разнообразию проявляемых ими свойств [2]. В настоящий момент известны сложные оксиды с такими типами структур, как: флюориты [3 – 5], перовскиты [3, 6], соединения с блочно-слоевой структурой K_2NiF_4 [7, 8], браунмиллериты [3, 4, 9], шпинели [2] и апатиты [3, 4, 10]. Среди перечисленных, с точки зрения кислородно-ионного переноса наиболее подробно описаны структуры с общей формулой ABO_3, относящиеся к классу перовскитов. Однако, в последние годы, в аспекте изучения ионного переноса, привлекли внимание соединения с блочно-слоевой структурой, также называемой структурой Раддлесдена-Поппера. Так, возможность кислородно-ионного переноса была обнаружена в соединениях на основе $BaNdInO_4$ [11]. Позднее, реализация такого переноса была установлена для соединений на основе $BaLaInO_4$ [12 – 15]. В этих работах было показано, что как $BaLaInO_4$, так и полученные на его основе путем допирования подрешеток лантана (ионами Ca^{2+}, Sr^{2+}, Ba^{2+}) и индия (ионами Ti^{4+}, Zr^{4+}) соединения являются смешанными, ионно-электронными проводниками. При этом допирование позволяет увеличить ионную проводимость

на 1.5 порядка величины вследствие формирования кислородных дефектов в анионной подрешетке.

Однако примененные для улучшения транспортных характеристик гетеровалентные типы допирования (акцепторное и донорное) сопровождаются изменением как геометрических размеров элементарных ячеек, так и концентрации кислородных дефектов. Соответственно, выявить эффекты влияния двух различных факторов (геометрического и концентрационного) не представляется возможным. Это позволяет говорить о том, что для блочно-слоевых структур на основе $BaLaInO_4$ фундаментальные закономерности ионного переноса в полной мере еще не установлены. Соответственно, получение и изучение соединений, полученных путем изовалентного допирования $BaLaInO_4$, является актуальным, поскольку при таком типе допирования формирования кислородных дефектов в анионной подрешетке не происходит. В рамках настоящей работы были получены сложные оксиды $BaLaIn_{1-x}Sc_xO_4$ (x = 0; 1) и изучены их электротранспортные свойства.

Образцы и методика эксперимента

Образцы $BaLaInO_4$ и $BaLaScO_4$ были получены методом твердофазного синтеза из предварительно осушенных $BaCO_3$, La_2O_3, In_2O_3, Sc_2O_3. Синтез проводили на воздухе при ступенчатом повышении температуры (800ºC – 1300ºC) и многократных перетираниях в агатовой ступке в среде этилового спирта. Время отжига на каждой стадии составляло 24 часа.

Рентгенографический анализ был выполнен на дифрактометре Bruker Advance D8 в CuK_α – излучении при напряжении на трубке 40 кВ и токе 40 мА. Съемка производилась в интервале $2\theta = 20°–80°$ с шагом 0.05°θ и экспозицией 1 с на точку. Расчеты параметров решетки проводили с помощью программы FullProf Suite.

Электропроводность исследуемых фаз изучалась в атмосферах сухого воздуха и сухого аргона, которую создавали путем циркуляцией газа через порошкообразный оксид фосфора P_2O_5 ($pH_2O = 3.5 \times 10^{-5}$ атм). Кроме того, для предотвращения возможной карбонизации керамики проводилось предварительное удаление углекислого газа CO_2 из воздуха с использованием реактива «Аскарит».

Для измерений электрических свойств образцы готовили в виде таблеток, спекание проводили при температуре 1300°C в течение 24 ч. Припекание платиновых электродов проводили при температуре 900°C в течение 3 ч.

Изучение электропроводности проводили методом электрохимического импеданса в частотном диапазоне 1 Гц–1 МГц с амплитудой сигнала 15 мВ с использованием измерителя параметров импеданса Elins Z-1000P. Расчет

объемного сопротивления проводили с использованием программного обеспечения Zview software fitting.

Результаты и обсуждение

Рентгенографический анализ полученных в работе образцов $BaLaInO_4$ и $BaLaScO_4$ показал, что они являются однофазными. Образец $BaLaInO_4$ характеризуется орторомбической симметрией (пространственная группа *Pbca*, *a* = 12.932 (3) Å, *b* = 5.906 (1) Å, *c* = 5.894 (2) Å), а образец $BaLaScO_4$ моноклинной симметрией (пространственная группа *C*12/*c*1, *a* = 19.552 (3) Å, *b* = 12.756 (4) Å, *c* = 13.265 (0) Å, β = 97.71°). На рисунке 1 приведены результаты полнопрофильного анализа для образца $BaLaScO_4$.

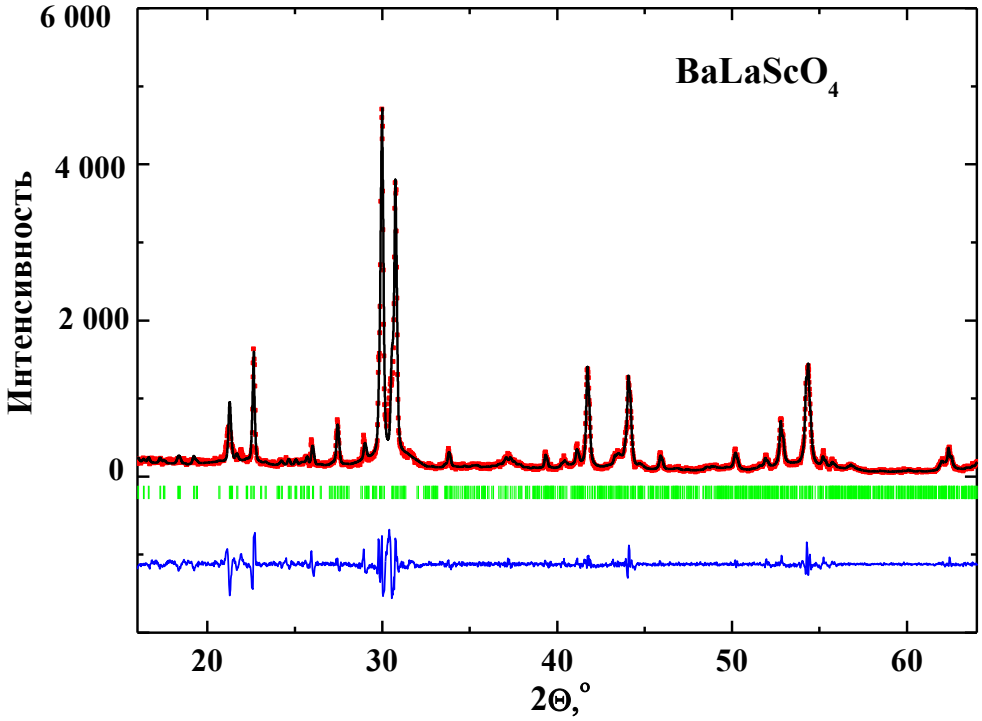
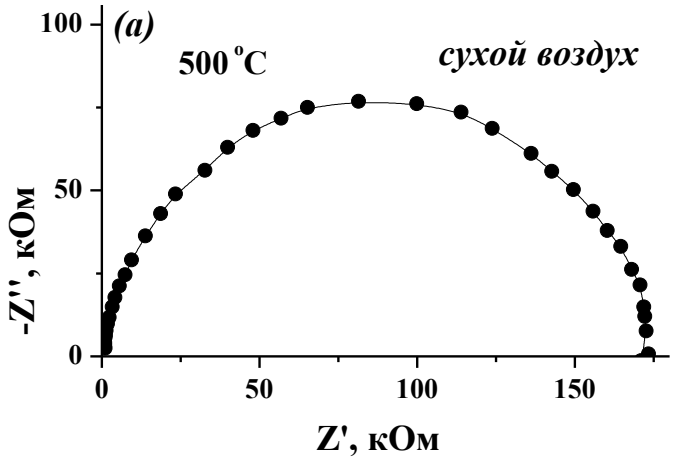


Рисунок 1 – Рентгенограмма образца $BaLaScO_4$, на которой показаны экспериментальные (точки), расчетные (линия), разностные (внизу) данные и угловые положения рефлексов (штрихи)

Изучение электропроводности проводили с помощью методов электрохимического импеданса в атмосферах сухого воздуха и сухого аргона. На рисунках 2*а* и 2*б* представлены годографы импеданса для температуры 500 °C, полученные в сухом воздухе (pO_2 = 0.21 атм) и сухом аргоне ($pO_2 \sim 10^{-5}$ атм) соответственно. Как видно, независимо от содержания кислорода в атмосфере, годографы представляют собой одну полуокружность, выходящую из начала координат и отвечающую сопротивлению объема зерен исследуемого

поликристаллического образца. Для расчетов электропроводности брали значение сопротивления, полученное при пересечении полуокружности с осью абсцисс.

На рисунке 3*а* представлены температурные зависимости образцов $BaLaInO_4$ и $BaLaScO_4$ в атмосфере сухого воздуха. Как видно, в области температур выше ~ 500 °С значения электропроводности для исследуемых образцов очень близки. При более низких температурах проводимость образца состава $BaLaScO_4$ понижается относительно значений для $BaLaInO_4$. То есть, образец, кристаллическая структура которого обладает более низкой симметрией, демонстрирует меньшие значения электропроводности в области низких температур. В атмосфере сухого аргона (рисунок 3*б*) значения электропроводности для образца $BaLaScO_4$ ниже, чем для образца $BaLaInO_4$ на ~ 0.2 порядка величины.



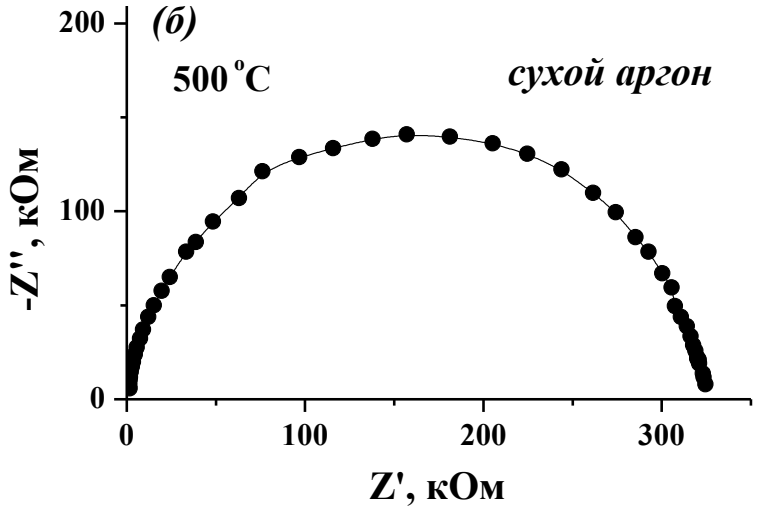
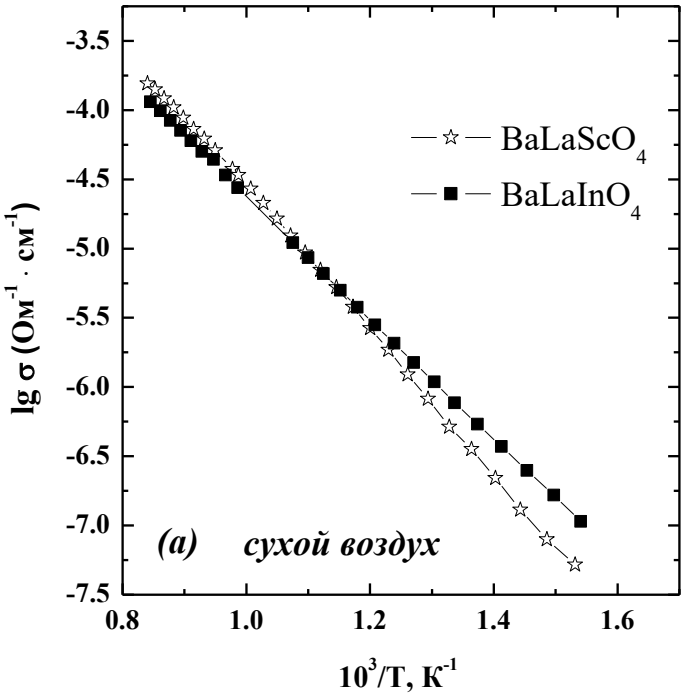


Рисунок 2 – Годографы импеданса, полученные в атмосферах сухого воздуха (*а*) и сухого аргона (*б*) при температуре 500 °С для образца $BaLaScO_4$



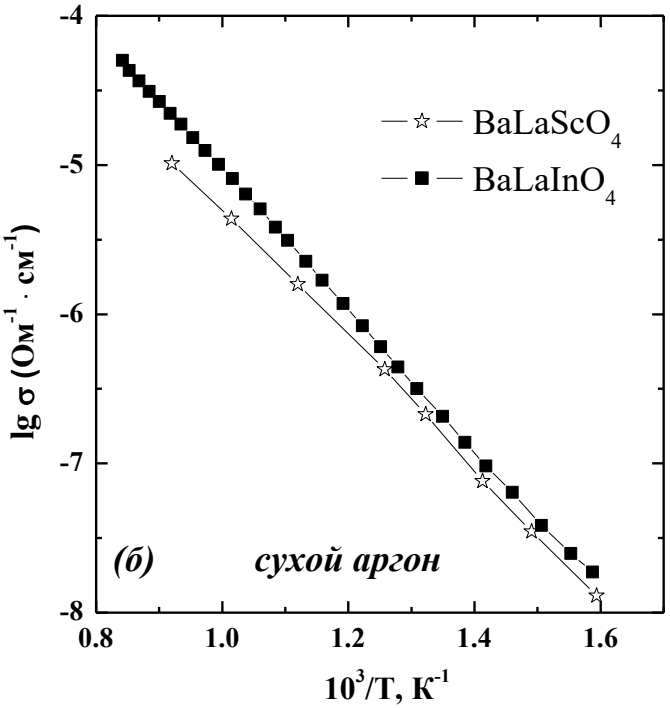
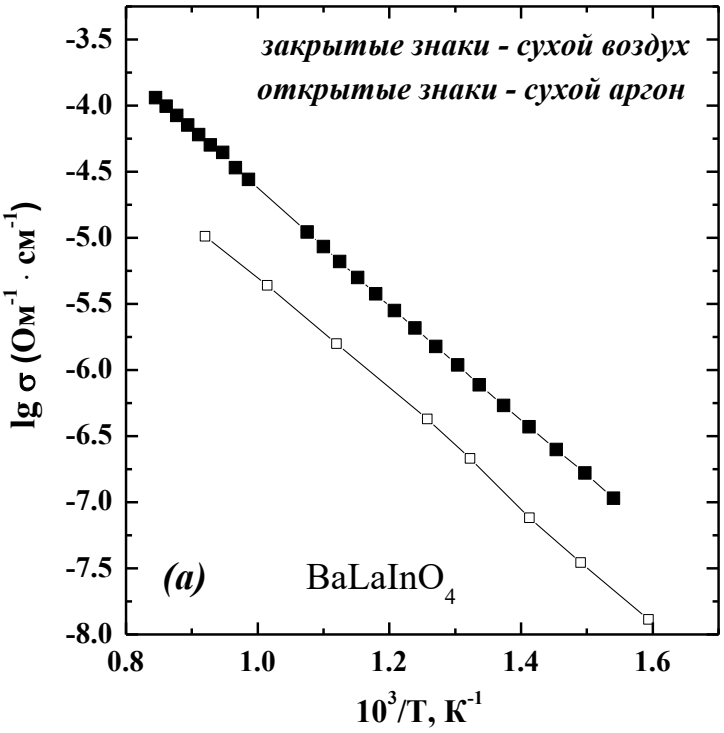


Рисунок 3 – Температурные зависимости электропроводности образцов $BaLaInO_4$ и $BaLaScO_4$ в атмосфере сухого воздуха (*а*) и сухого аргона (*б*)

На рисунках 4*а* и 4*б* выполнено сравнение температурных зависимостей для каждого из исследуемых образцов, полученных в атмосферах с разным содержанием кислорода в газовой фазе. Как видно, для образца $BaLaInO_4$ значения электропроводности, полученные в сухом аргоне, значимо ниже, чем в сухом воздухе. Доля кислородно-ионного переноса, рассчитанная как отношение электропроводностей в аргоне и на воздухе, составляет ~ 20 %. Для образца

$BaLaScO_4$, напротив, значения электропроводности, полученные на воздухе и в аргоне, близки, и доля кислородно-ионного переноса для него составляет ~ 80 %.



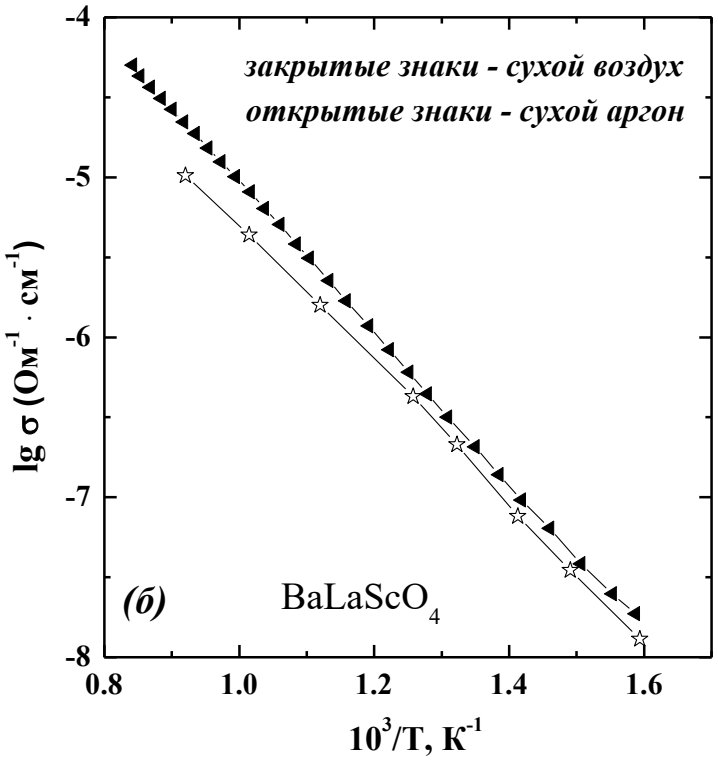


Рисунок 4 – Температурные зависимости электропроводности образцов $BaLaInO_4$ (*а*) и $BaLaScO_4$ (*б*) в атмосферах сухого воздуха (закрытые знаки) и сухого аргона (открытые знаки)

Заключение

В работе методом твердофазного синтеза получены сложные оксиды $BaLaIn_{1-x}Sc_xO_4$ (x = 0; 1), проведена их рентгенографическая аттестация. Установлено, полное замещение атомов индия на атомы скандия приводит к изменению типа симметрии кристаллической структуры образцов. Показано, что значения электропроводности в сухом воздухе при температурах ниже 500 °С для образа $BaLaScO_4$ несколько ниже, чем для $BaLaInO_4$. Однако образец $BaLaScO_4$ обладает значимо большим вкладом кислородно-ионного транспорта (~ 80 %) по сравнению с $BaLaInO_4$ (~ 20 %).

Библиографический список

1. Synthesis and oxide ion conductivity of new layered perovskite $La_{1-x}Sr_{1+x}InO_{4-d}$ / Sumio Kato, Masataka Ogasawara, Mikio Sugai, Shinichi Nakata. – DOI 10.1016/S0167-2738(02)00138-8 // Solid State Ionics. – 2002. – Vol. 149, Iss. 1/2. – P. 53–57.
2. Ishihara T. Perovskite Oxide for Solid Oxide Fuel Cells / T. Ishihara. – New York : Springer Science & Business Media, 2009. – 294 p.
3. Boivin J. C. Recent Material Developments in Fast Oxide Ion Conductors / J. C. Boivin, G. Mairesse. – DOI 10.1021/cm980236q // Chemistry of Materials. – 1998. – Vol. 10, Iss. 10. – P. 2870–2888.
4. Kilner J. A. Materials for Intermediate-Temperature Solid-Oxide Fuel Cells / J. A. Kilner, M. Burriel. – DOI 10.1146/annurev-matsci-070813-113426 // Annual Review of Materials Research. – 2014. – Vol. 44. – P. 365–393.
5. Factors controlling the oxide ion conductivity of fluorite and perovskite structured oxides / M. Mogensen, D. Lybye, N. Bonanos [et al.]. – DOI 10.1016./j.ssi.2004.07.036 // Solid State Ionics. – 2004. – P. 279–286.
6. Bhalla A. S. Recent Material Developments in Fast Oxide Ion Conductors / A. S. Bhalla, T. E. Mallouk. – DOI 10.1021/cm010689m // Chemistry of Materials. – 2002. – Vol. 14, Iss. 4. – P. 1455–1471.
7. Ruddlesden S. N. New compounds of the K_2NiF_4 type / S. N. Ruddlesden, P. Popper. – DOI 10.1107/S0365110X57001929 // Acta Crystallographica. – 1957. – Vol. 10. – P. 538 – 539.
8. Ruddlesden S. N. The compound $Sr_3Ti_20_7$ and its structure / S. N. Ruddlesden, P. Popper. – DOI 10.1107/S0365110X58000128 // Acta Crystallographica. – 1958. – Vol. 11. – P. 54–55.
9. Interstitial oxide ion conductivity in the layered tetrahedral network melilite structure / X. Kuang, M. A. Green, H. Niu [et al.]. – DOI 10.1038/nmat2201 // Nature Publishing Group. – 2008. – Vol. 7, Iss. 6. – P. 498–504
10. Effects of cation- or oxide ion-defect on conductivities of apatite-type La–Ge–O system ceramics / Susumu Nakayamaa, Yoshikatsu Higuchib, Yuki Kondoa, Masatomi Sakamoto. – DOI 10.1016/j.ssi.2004.03.003 // Solid State Ionics. – 2004. – Vol. 170, Iss. 3/4. – P. 219–223.
11. Improved oxide-ion conductivity of $NdBaInO_4$ by Sr doping / Kotaro Fujii, Masahiro

Shiraiwa, Yuichi Esaki [et al.]. – DOI 10.1039/C5TA01336D // Journal of Materials Chemistry A. – 2015. – Vol. 3. – P. 11985–11990.
12. Incorporation and Conduction of Protons in Ca, Sr, Ba-Doped $BaLaInO_4$ with Ruddlesden-Popper Structure / N. Tarasova, I. Animitsa, A. Galisheva, D. Korona. – DOI 10.3390/ma12101668 // Materials. – 2019. – Vol. 12, Iss. 10. – P. 1668.
13. Protonic transport in the new phases $BaLaIn_{0.9}M_{0.1}O_{4.05}$ (M=Ti, Zr) with Ruddlesden-Popper structure / N. Tarasova, I. Animitsa, A. Galisheva, V. Pryakhina. – DOI 10.1016/j.solidstatesciences.2020.106121 // Solid State Sciences. – 2020. – Vol. 101. – P. 106121.
14. Tarasova N. Electrical properties of new protonic conductors $Ba_{1+x}La_{1-x}InO_{4-0.5x}$ with Ruddlesden-Popper structure / N. Tarasova, I. Animitsa, A. Galisheva. – DOI 10.1007/s10008-020-04630-1 // Solid State Electrochem. – 2020. – Vol. 24, Iss. 7. – P. 1497–1508.
15. Tarasova N. Improvement of oxygen-ionic and protonic conductivity of $BaLaInO_4$ through Ti doping / N. Tarasova, A. Galisheva, I. Animitsa. – DOI 10.1007.s11581-020-03659-6 // Ionics. – 2020. – Vol. 26, Iss. 10. – P. 5075–5088.

УДК 620.3:669.71

Ахмадиева А.А., Кахидзе Н.И., Хрусталёв А.П., Жуков И.А.

ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ AL2O3 НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО АЛЮМИНИЯ МАРКИ А0 ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ ДЕФОРМАЦИИ

Аннотация. В работе рассмотрено влияние тугоплавких наночастиц Al_2O_3 на структуру и механические свойства технически чистого алюминия при различных скоростях деформации. Для введения наночастиц оксида алюминия, методом ударно-волнового компактирования были получены лигатуры Al-Al_2O_3. Введение лигатуры сопровождалось механическим перемешиванием. Расплав, с растворенной в нем лигатурой, был подвержен ультразвуковой обработке. Разливка сопровождалась вибрационной обработкой кокиля. Исследования структуры методом растровой электронной микроскопии показали, что наночастицы оксида алюминия способствуют измельчению среднего размера зерна алюминия. Механические испытания на растяжение показали, что введение 1 мас. %. наночастиц приводит к увеличению механических свойств сплава при скорости деформации 0.001 $с^{-1}$. Увеличение скорости деформации привело к увеличению пределов текучести и прочности до 36 и 84 МПа, а также к снижению пластичности исследуемых сплавов с 42 до 40 %.

Ключевые слова: Алюминий, наночастицы, лигатура, ударно-волновое компактирование, деформация, модифицирование, структура, механические свойства.

Abstract. The paper considers the effect of refractory Al_2O_3 nanoparticles on the mechanical properties of commercially pure aluminum at different strain rates. For the introduction of aluminum oxide nanoparticles, Al-Al_2O_3 ligatures were obtained by the method of shock-wave compaction. The introduction of the ligature was accompanied by mechanical stirring. The melt, with the ligature dissolved in it, was subjected to ultrasonic treatment. Casting was accompanied by vibration treatment of the chill mold. Scanning electron microscopy studies show that nanoparticles of aluminum oxide contribute to the grinding of medium-sized aluminum. Mechanical tensile tests showed that the introduction of 1 wt. %. nanoparticles leads to an increase in mechanical properties at a strain rate of 0.001 s-1. An increase in the deformation rate led to an increase in the yield strength and strength of 36 and 84 MPa, as well as a decrease in the quality of the investigated alloys from 42 to 40%.

Keywords: Aluminum, nanoparticles, ligature, shock-wave compaction, deformation, modification, structure, mechanical properties.

Введение

Алюминиевая промышленность является первой по масштабам производства среди цветных металлов, а среди всех отраслей металлургии по объемам уступает только производству стали [1]. В авиационной, машиностроительной, космической, строительной, электротехнической, а также многих других видах промышленности широкое применение получили сплавы алюминия благодаря комплексу физико-механических свойств, таких как высокая удельная прочность, электропроводность, коррозионная стойкость,

свариваемость [2,3]. Наибольшее использование алюминия сконцентрировано в транспортной, авиационной и строительной [4] отраслях, в производстве потребительских товаров и электроэнергетике. Замена более тяжелой стали на лёгкие алюминиевые сплавы при изготовлении деталей механизмов и конструкций приводит к уменьшению общего веса за счет низкой удельной плотности алюминия, что позволяет повысить грузоперевозочную эффективность, уменьшить топливопотребление и снизить выбросы CO2 в атмосферу. Несмотря на низкую плотность, недостаточно высокие механические свойства алюминиевых сплавов не позволяют расширить сферу их применения.

Новые алюминиевые сплавы, имеющие более высокие механические характеристики, возможно получить при помощи легирования [5], термообработки [6], механического деформирования [7], дисперсного упрочнения и модифицирования [8,9]. В качестве дисперсных упрочнителей применяют химически стабильные тугоплавкие соединения. Согласно ряду работ [10–16], чаще всего используются карбид титана, оксид кремния, диборид титана, а также редкоземельные металлы. В качестве модификаторов структуры чаще всего применяют частицы титана и бора нано- и микроразмерного диапазона, которые выступают в качестве центров кристаллизации [17–19]. Однако, вводимые в расплав нано- и микрочастицы могут выступать одновременно в качестве и модификаторов, и упрочнителей [20].

Модифицирование структуры алюминиевого сплава позволяет реализовать увеличение механических свойств по механизму Холла-Петча, который заключается в увеличении предела текучести и анизотропии свойств с уменьшением размера зерна, а также уменьшением размера дефектов (микропор, выделений вторичных фаз по границам зерен). При легировании модификация зеренной структуры тем выше, чем выше структурное соответствие зародышеобразующих фаз и α-Al [2] Образование вторичных интерметаллидов которые по размерно-структурным параметрам почти полностью соответствуют структурной решетке алюминия, позволяет добиваться заметного вклада в измельчение микроструктуры сплава и, соответственно, увеличения физико-механических свойств алюминиевого сплава. Упрочнение сплавов за счет уменьшения среднего размера зерна связано с затруднением движения дислокаций на границах зерен. Закон Холла-Петча описывает соотношение предела текучести и среднего размера зерна, согласно которому предел текучести увеличивается с измельчением зеренной структуры [21]. В виде уравнения 1 закон записывается следующим образом:

$$\Delta\sigma_{H-P} = \frac{k_y}{\sqrt{d}} \quad (1)$$

Наличие твёрдых неперерезаемых частиц позволяет реализовать механизм Орована, который заключается во взаимодействии частиц с дислокациями. При огибании вокруг частицы, дислокации искривляются и образуют дислокационные кольца (петли Орована) [22], упрочняющие плоскость скольжения. Упрочнение по Оровану происходит за счет внедрения нано- и микрочастиц в матричный расплав. За счет препятствия близкорасположенных частиц перемещению дислокаций происходит повышение прочности материала, которое может быть рассчитано по формуле 2:

$$\Delta\sigma = \frac{0.13bG}{d_p\left(\sqrt[3]{\frac{1}{2}v_p} - 1\right)}\ln\left(\frac{d_p}{2b}\right) \tag{2}$$

Еще одним способом упрочнения материала является перенос нагрузки от мягкой матрицы к твердым и жестким частицам под воздействием внешней нагрузки. Уравнение 3, введенное Нарданом и Прево, позволяет спрогнозировать вклад в упрочнение металла из-за переноса нагрузки в композитах, модифицированных частицами [23]:

$$\Delta\sigma_{LT} = \vartheta_p\sigma_m\left[\frac{(l+t)A}{4l}\right] \tag{3}$$

Результирующая прочность полученного модифицированного сплава может быть рассчитана посредством суммирования исходного предела текучести с перечисленными механизмами упрочнения, связанными с единичным упрочняющим эффектом (уравнение 4):

$$\sigma_{\mathrm{c}} = \sigma_m + \sum_i \Delta\sigma_i \tag{4}$$

Введение в расплав металла тугоплавких частиц, в том числе керамических частиц наноразмерного диапазона [24], является одним из перспективных методов, сочетающих в себе модификацию структуры и дисперсное упрочнение сплава [20]. В данной работе в качестве упрочняющих частиц были выбраны керамические наночастицы оксида алюминия Al_2O_3. Проведено большое количество исследований влияния нанооксида алюминия на физико-механические свойства алюминиевых сплавов [25,26].

В большинстве научных публикаций [27–31], посвященных исследованию влияния наночастиц на структуру и свойства алюминиевых сплавов, в качестве матрицы использовались сплавы со сложным химическим составом, что не позволяет полноценно оценить вклад наночастиц на структуру и деформационное поведение сплава. Цель работы – исследование влияния концентрации наночастиц на физико-механические характеристики и структуру технически чистого алюминия марки А0.

Исходные материалы

В качестве исходного материала в работе использовался технически чистый алюминий марки А0 (Al ≥ 99 %). В качестве модифицирующих частиц были выбраны тугоплавкие наночастицы оксида алюминия Al_2O_3, полученные методом электровзрыва проводника [32]. Частицы Al_2O_3 (5 мас. %) были деагломерированы в микропорошке алюминия (95 мас. %), а затем методом ударно-волнового компактирования [33] была получена лигатура. При температуре 730 °С лигатуры вводились в расплав алюминия с одновременным воздействием внешних полей. Лигатура вводилась в зону воздействия механического смесителя до полного растворения лигатуры с последующей ультразвуковой обработкой. Ультразвуковая обработка осуществлялась в течение 2 минут с использованием магнитострикционного преобразователя с частотой 17.5 кГц и мощностью 3.5 кВт. Ультразвуковая обработка позволяет повысить смачиваемость модифицирующих частиц и дегазировать расплав, а также приводит к уменьшению среднего размера зерна. Для дополнительной дегазации расплава разливка сопровождалась вибрацией кокиля на вибростоле. В аналогичных условиях были получены отливки без содержания наночастиц для оценки их влияния на структуру и физико-механические свойства полученных сплавов. В результате литья в кокиль были получены отливки с содержанием наночастиц оксида алюминия в количестве 0.1, 0.5, 1, 1.5 масс. %. Для оценки влияния ультразвука также были получены отливки без ультразвуковой обработки. После получения исследуемых сплавов, полученные образцы были подвержены часовому термическому отжигу при температуре 300 °С.

Методы исследования

На электронном сканирующем микроскопе методом EBSD [34] были получены изображения микроструктуры исследуемых образцов, средний размер зерна посчитан методом случайных секущих по полученным изображениям.

Твердость по методу Бринелля была определена на твердомере Duramin-500 A75 при нагрузке 250 кг на сферический индентор диаметром 5 мм и выдержке 10

секунд. Микротвердость по Виккерсу измеряли на автоматическом микротвердомере DURAMIN 5 внедрением в образец алмазной пирамидки при нагрузке 50 грамм и выдержке 10 секунд.

Испытания по одноосному растяжению плоских образцов проводились при комнатной температуре на сервогидравлическом стенде Instron 40/50-20 со скоростью движения подвижной траверсы 0.2 мм/мин. Эксперименты, направленные на изучение скоростной чувствительности материалов, проводились при скоростях деформации 0.001, 0.01, 0.1 $с^{-1}$ на испытательной машине Instron 40/50-20.

Результаты и обсуждение

Средний размер наночастиц в порошке оксида алюминия составил 50 нм (рис. 1а).

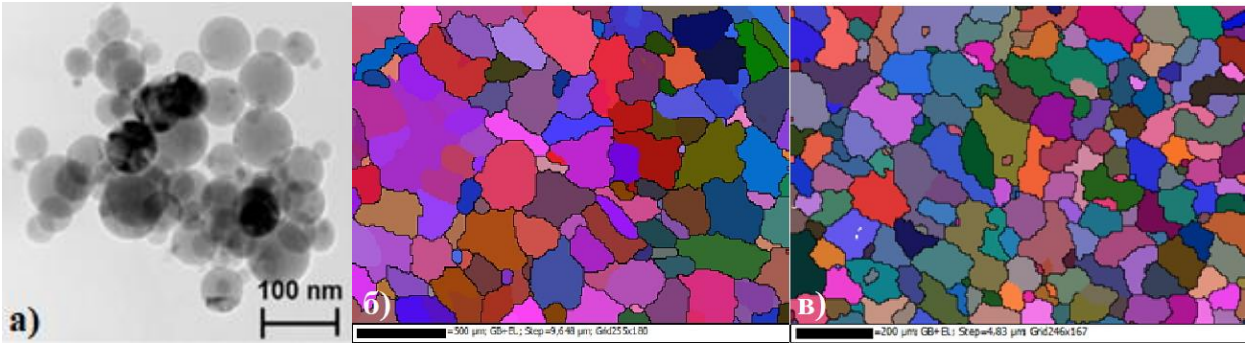


Рисунок 1 – ПЭМ-изображение наночастиц оксида алюминия Al_2O_3 (а); микроструктура сплава А0 (б) и А0 + 1 мас. % Al_2O_3 (в)

Средний размер зерна исходного сплава А0 составил 200 мкм (рис. 1б). Введение 0.1, 0.5, 1 и 1.5 мас. % наночастиц оксида алюминия привело к измельчению среднего размера зерна до 198, 112, 69 (рис. 1в) и 59 мкм, соответственно. Использование наночастиц оксида алюминия в качестве дополнительных центров кристаллизации за счёт их активации в процессе ультразвуковой обработке позволяет значительно модифицировать структуру алюминиевого сплава.

Изменение содержания наночастиц оксида алюминия не приводит к увеличению твёрдости и микротвёрдости сплава А0, средние значения которых составили 20 HB и 26 HV (таблица 1). На рисунке 2 представлены диаграммы растяжения алюминиевых сплавов с различным содержанием наночастиц оксида алюминия.

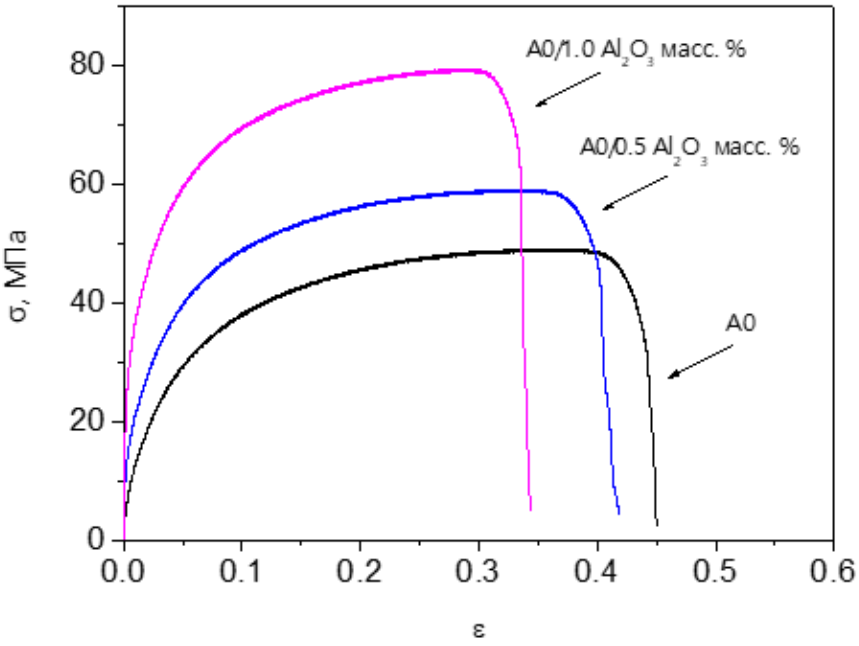


Рисунок 2 – Кривые деформации исследуемых сплавов

Таблица 1 – Механические свойства полученных образцов

Концентрация Al_2O_3, %	Твёрдость, HB	Микротвёрдость, HV	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	ε_{max}, %
0	19±0.21	25±1.67	11±1.67	47±1.27	44±2.9
0.1	20±0.86	26±1.47	28±3.91	68±1.45	42±4.95
0.5	20±0.62	26±1.66	19±4.94	63±5.25	42±6.55
1	21±0.72	27±1.52	22±4.54	72±8.20	36±3.92
1.5	21±0.54	25±1.82	17±2.25	62±7.32	34±4.83

Исследования механических свойств полученных сплавов при растяжении показали, что увеличение концентрации частиц оксида алюминия приводит к снижению пластичности с 44 до 34 %. Наибольший предел прочности достигается при введении 1 мас. % оксида алюминия, который увеличивается с 47 до 72 МПа по сравнению с исходным сплавом.

Деформационные кривые, полученные при растяжении при скоростях деформации от 0.001 до 0.1 с-1 представлены на рисунке 3.

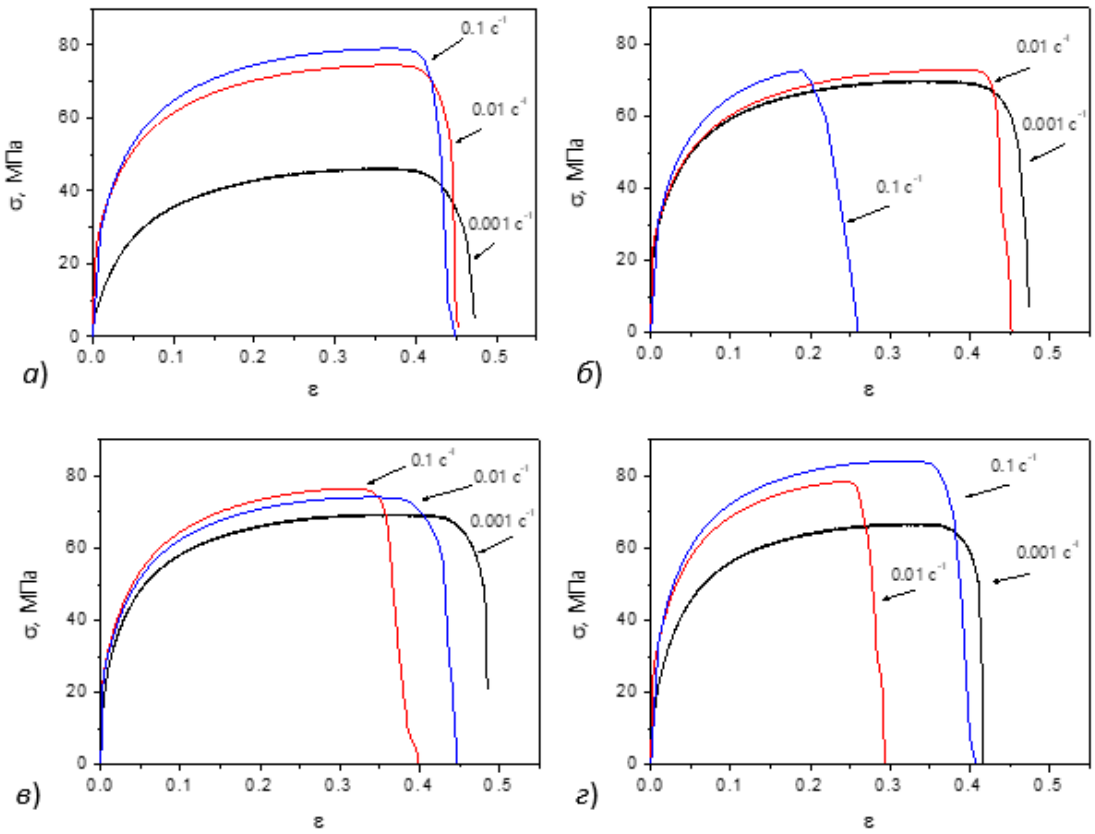


Рисунок 3 – Кривые растяжения исследуемых сплавов при разных скоростях деформации: исходный сплав А0 (а); А0 + 0,1 масс. % Al_2O_3 (б); А0 + 0,5 масс. % Al_2O_3 (в); А0 + 1,0 масс. % Al_2O_3 (г)

Таблица 2 – Механические характеристики полученных сплавов при разных скоростях деформации

Концентрация Al_2O_3, %	Скорость деф-ии, c^{-1}	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_B,МПа	ε_{max}, %
0	0.001	11 ± 3	46 ± 9	47 ± 5
	0.01	24 ± 5	74 ± 11	45 ± 6
	0.1	31 ± 6	79 ± 12	43 ± 5
0.1	0.001	19 ± 5	70 ± 11	47 ± 5
	0.01	26 ± 5	72 ± 11	45 ± 5
	0.1	33 ± 6	73 ± 11	26 ± 4
0.5	0.001	20 ± 5	69 ± 11	48 ± 6
	0.01	26 ± 6	74 ± 11	46 ± 5
	0.1	24 ± 5	77 ± 13	38 ± 5
1	0.001	18 ± 4	66 ± 11	42 ± 6
	0.01	28 ± 6	78 ± 12	29 ± 5
	0.1	36 ± 6	84 ± 12	40 ± 5

Выявлено, что при увеличении скорости деформации с 0.001 до 0.1 $с^{-1}$ происходит повышение пределов текучести и прочности (таблица 2). Сплав, содержащий 0.1 мас. % Al_2O_3 (рис. 3б), демонстрирует увеличение предела текучести с 19 до 33 МПа и предела прочности с 70 до 73 МПа. Сплав, содержащий 0.5 мас. % Al_2O_3 (рис. 3в), демонстрирует увеличение предела текучести с 20 до 24 МПа, предела прочности с 69 до 77 МПа, соответственно. Наиболее выраженный прирост предела текучести с 11 до 31 МПа и предела прочности с 46 до 79 МПа выявлен у исходного сплава без содержания частиц (рис. 3а). Одновременно снижается максимальная деформация до разрушения. Например, максимальная деформация до разрушения для сплава А0+0.5 мас. % Al_2O_3, снижается с 48 до 38 %. Также следует заметить, что исходный сплав без содержания частиц наименее чувствителен к увеличению скорости деформации.

Заключение

Установлено, что введение 0.1, 0.5, 1, 1.5 масс. % наночастиц оксида алюминия приводит к уменьшению среднего размера зерна технически чистого алюминия с 200 до 59 мкм.

Установлено, что за счёт измельчения зерна и дисперсного упрочнения наночастицами оксида алюминия металлической матрицы происходит увеличение предела текучести и предела прочности. При этом наибольший предел текучести достигается при введении 0.1 мас. % Al_2O_3, который увеличивается со 11 до 28 МПа, а предел прочности – при введении 1 мас. % Al_2O_3, который увеличивается с 47 до 72 МПа.

Установлено, что увеличение скорости деформации с 0.001 до 0.1 $с^{-1}$ приводит к увеличению пределов текучести и прочности с одновременным снижением максимальной деформации до растяжения. Наибольшее увеличение предела текучести с 11 до 31 МПа и предела прочности с 46 до 79 МПа достигнуто у исходного сплава. Наибольшее снижение максимальной деформации с 48 до 38 % демонстрируется у сплава с 0.5 мас. % Al_2O_3.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госзадание № 0721-2020-0028).

Библиографический список

1. Как устроен мировой рынок алюминия? // Сайт об алюминии. – URL: https://aluminiumleader.ru/economics/world_market (дата обращения: 13.10.2020).
2. Косов Я. И. Перспективные композиции алюминиевых сплавов и лигатур / Я. И.

Косов. – DOI 10.18454/IRJ.2016.53150 // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – Вып. 53, № 11, ч. 4. – С. 73–77.
3. Перспективы рынка алюминия // Алюминиевая ассоциация : сайт. – URL: http://www.aluminas.ru/aluminum/prospects (дата обращения: 13.10.2020).
4. Алюминий в строительстве: проблемы и перспективы «крылатого металла» // Алюминиевая ассоциация : сайт. – URL: http://www.aluminas.ru/media/media-publications/aluminium_in_construction_problems_and_prospects_winged_metal (дата обращения: 17.11.2020).
5. Хэтч Дж. Е. Алюминий: свойства и физическое металловедение : справочник / Дж. Е. Хэтч ; пер. с англ. Э. З. Непомнящей. – Москва : Металлургия, 1989. – 425 с. – ISBN 5-229-00088-0.
6. Колачев Б. А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов : учеб. пособие для вузов / Б. А. Колачев, В. А. Ливанов, В. И. Елагин. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Металлургия, 1981. – 416 с.
7. Исследование влияния частиц TiB2 на структуру, деформационное поведение и свойства алюминиевого сплава 1550 / А. Б. Ворожцов, В. В. Платов, А. А. Козулин [и др.] // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2020. – № 67. – С. 102–116.
8. Investigating aluminum alloy reinforced by graphene nanoflakes / S. J. Yan, S. L. Dai, X. Y. Zhang, Changhong Yang. – DOI 10.1016/j.msea.2014.06.077 // Materials Science and Engineering. A. – 2014. – Vol. 612. – P. 440–444.
9. Ex Situ Introduction and Distribution of Nonmetallic Particles in Aluminum Melt: Modeling and Experiment / S. Vorozhtsov, L. L. Min'kov, V. Dammer [et al.]. – DOI 10.1007/S11837-017-2594-1 // JOM. – 2017. – Vol. 69, Iss. 12. – P. 2653–2657.
10. Sreekumar V. M. Prospects of In-Situ α-Al_2O_3 as an Inoculant in Aluminum: A Feasibility Study / V. M. Sreekumar, N. H. Babu, D. G. Eskin // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2017. – Vol. 26, Iss. 9. – P. 4166–4176.
11. Umasankar V. Experimental evaluation of the influence of processing parameters on the mechanical properties of SiC particle reinforced AA6061 aluminium alloy matrix composite by powder processing / V. Umasankar, M. A. Xavior, S. Karthikeyan // Journal of Alloys and Compounds. – 2014. – Vol. 582. – P. 380–386.
12. Синтез алюминиевых композитов с наноразмерными частицами карбида и борида титана / И. Г Бродова, М. А. Уймин, В. В. Астафьев [и др.] // Письма о материалах. – 2013. – Т. 3, № 2. – С. 91–94.
13. The application of external fields to the manufacturing of novel dense composite master alloys and aluminum-based nanocomposites / S. A. Vorozhtsov, D. Eskin, Tamayo Javier [et al.] // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2015. – Vol. 46, Iss. 4. – P. 2870–2875.
14. Каблов Е. Н. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий / Е. Н. Каблов, О. Г. Оспенникова, А. В. Вершков // Труды ВИАМ. – 2013. – № 2. – С. 1.
15. Determination of Er and Yb solvuses and trialuminide nucleation in Al–Er and Al–Yb alloys / Y. Zhang, Gao Kunyuan, Wen Shengping [et al.]. – DOI 10.1016/J.JALLCOM.2013.11.211 // Journal of Alloys and Compounds. – 2014. –

Vol. 590, Iss. 25. – P. 526–534.
16. Разработки и исследования в области модифицирования и дисперсного упрочнения алюминиевых сплавов неметаллическими наночастицами / А. Б. Ворожцов, И. А. Жуков, М. Г. Хмелева [и др.] // Цветные металлы и минералы : сб. докл. XI Междунар. конгресса. – Красноярск, 2019. – С. 349–355.
17. Калинина Н. Е. Модифицирование литейных алюминиевых сплавов порошковыми композициями / Н. Е. Калинина, В. П. Белоярцева, О. А. Кавац // Вестник двигателестроения. – 2006. – № 2. – С. 193–195.
18. Платов В. В. Исследование воздействия модификатора TiB2 на структуру и механические свойства алюминиевого сплава АМг5 / В. В. Платов, Н. И. Кахидзе, И. А. Жуков // Перспективы развития фундаментальных наук : сб. науч. тр. XVII Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (Томск, 21–24 апр. 2020). – Томск, 2020. – Т. 2 : Химия. – С. 146–148.
19. Исследование влияния диборида титана и эрбия на структуру и механические свойства алюминиевого сплава АМг5 / Н. И. Кахидзе, А. А. Ахмадиева, Н. З. Гизатулина [и др.] // Физика твердого тела : ФТТ–2020 : сб. материалов XVII Рос. науч. студен. конф. (Томск, 18 мая 2020 г.). – Томск, 2020. – С. 33–35.
20. Hall-Petch relationship in Mg alloys: A review / H. Yu, Y. Xin, M. Wang, Q. Liu // Journal of Materials Science & Technology. – 2018. – Vol. 34, Iss. 2. – P. 248–256.
21. Humphreys F. J. Recrystallization and Related Annealing Phenomena / F. J. Humphreys, M. Hatherly. – 2nd ed. – Оксфорд : Elsevier Science & Tech., 2004. – P. 342.
22. Zhang Z. Contribution of Orowan strengthening effect in particulatereinforced metal matrix nanocomposites / Z. Zhang, D. L. Chen // Materials Science and Engineering. A. – 2008. – Vol. 483/484. – P. 148–152.
23. Кветинская А. В. Механические свойства материалов на основе алюминия, дисперсно-упрочненных наноразмерными частицами Al_2O_3 : спец. 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела» : автореф. дис. … канд. физ.-мат. наук / А. В. Кветинская. – Томск, 2019. – 24 с. – Место защиты: Нац. исслед. Том. гос. ун-т.
24. Влияние наночастиц Al_2O_3 на микроструктуру и макроскопические свойства сплава Д16 / П. О. Суходаев, М. Ю. Чулкова, В. И. Турчин [и др.] // Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы : тез. докл. VIII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (Красноярск, 24–25 окт. 2019 г.). – Красноярск, 2019. – С. 69–70.
25. Влияние легирования наночастицами Al_2O_3 и интенсивной пластической деформации на структуру и механические свойства алюминиевого сплава 6082 / Е. В. Найденкин, С. А. Ворожцов, И. П. Мишин // Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций : тез. докл. междунар. конф. (Томск, 19–23 сент. 2016 г.). – Томск, 2016. – С. 137.
26. Суходаев П. О. Улучшение механических свойств алюминиевых сплавов модифицированием наночастицами / П. О. Суходаев, В. Е. Редькин // Современные проблемы радиоэлектроники : сб. науч. тр. XVII Всерос. науч.-техн. конф. – Красноярск, 2014. – С. 564–568.

27. Физико-механические и электрические свойства литых сплавов на основе алюминия, упрочненных наночастицами алмаза / С. А. Ворожцов, Д. Г. Эскин, С. Н. Кульков [и др.] // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т. 57, № 11. – С. 31–36.
28. Влияние внешних воздействий на расплав и неметаллических наночастиц на структуру и механические характеристики легких сплавов на основе алюминия и магния / А. Б. Ворожцов, П. А. Данилов, И. А. Жуков [и др.] // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2020. – № 64. – С. 91–107.
29. Курганова Ю. А. Влияние дискретной добавки оксида алюминия на структуру и свойства алюминиевого сплава / Ю. А. Курганова, С. П. Щербаков // Записки Горного института. – 2017. – Т. 228. – С. 717–721.
30. The Impact of Particle Reinforcement with Al_2O_3, TiB_2 and TiC and Severe Plastic Deformation Treatment on the Combination of Strength and Electrical Conductivity of Pure Aluminum / I. A. Zhukov, A. A. Kozulin, A. P. Khrustalyov [et al.]. – DOI 10.3390/met9010065 // Metals. – 2019. – Vol. 9, Iss. 1. – P. 65.
31. Консолидация биметаллических наноразмерных частиц и формирование нанокомпозитов в зависимости от условий ударно-волнового компактирования / С. А. Ворожцов, О. Б. Кудряшова, М. И. Лернер [и др.] // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2017. – Т. 60, № 7. – С. 147–152.
32. Применение EBSD анализа в физическом материаловедении (обзор) / В. Н. Даниленко, С. Ю. Миронов, А. Н. Беляков, А. П. Жиляев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2012. – Т. 78, № 2. – С. 28–46.

УДК 621.039

Аладаилах М.В., Ширманов И.А., Стругов Е.Д., Ташлыков О.Л., Эке К., Илдырым А.

ОЦЕНКА РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ Y_2O_3-MnO_2-Al_2O_3-SiO_2-CaO С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ PHY-X И ИМИТАЦИОННОГО КОДА GEANT4

Аннотация. Представлены результаты оценки экранирующих способностей стёкол, содержащих различные соотношения оксида иттрия Y_2O_3 и оксида марганца MnO_2 по отношению к гамма-излучению с помощью программного обеспечения Phy-X и платформы моделирования процессов прохождения элементарных частиц через вещество Geant4 в диапазоне энергий от 0,1218 до 1,4580 МэВ. Представлены результаты расчетов массового коэффициента ослабления и слоя половинного ослабления для исследуемых образцов стекол.

Ключевые слова: массовый коэффициент ослабления, имитационный код Geant4, экранирующие способности, радиационная защита.

Abstract. The results of evaluating the screening capabilities of glasses containing different ratios of yttrium oxide Y_2O_3 and manganese oxide MnO_2 in relation to gamma radiation using the Phy-X software and a platform for modeling the processes of passage of elementary particles through the Geant4 substance in the energy range from 0,1218 to 1, 4580 MeV. The results of calculations of the mass attenuation coefficient and the half-attenuation layer for the studied glass samples are presented.

Key words: mass attenuation coefficient, Geant4 simulation code, shielding capabilities, radiation protection.

Введение

Широкое применение ядерной энергии во всем мире влечет за собой развитие материалов радиационной защиты. Существует три способа снижения влияния ионизирующего излучения на человека. Это воздействие на фактор времени, расстояния и радиационный параметр [1]. Радиационный параметр подразумевает использование различных вариантов снижения уровня излучения от радиоактивного источника путем использования экранирования, дезактивации и других вариантов. Экранирование является наиболее распространенным способом снижения облучаемости человека [2].

Стоимость защиты современных ядерно-технических установок может составлять 20-30% стоимости сооружения, при этом толщина защиты может достигать больших размеров [3]. Поэтому оптимизация состава радиационно-защитных материалов является важным мероприятием с целью снижения общей стоимости радиационной защиты при максимальных показателях защитных свойств материалов [4]. При этом большое внимание уделяется стеклам,

композитам, бетонам, полимерам и природным материалам, которые могут быть использованы как защитные материалы от ионизирующего излучения [5].

Стекла являются перспективными материалами, обладающими высокой радиационной стойкостью благодаря своему составу. Они могут использоваться в различных отраслях атомной энергетики, где есть необходимость визуального контроля радиоактивного источника.

В настоящее время многие ученые мира, в том числе и Уральского федерального университета, проводят расчетно-экспериментальные исследования в области оптимизации состава защитных стекол [6], [7], [8], [9]. При этом используются стеклообразующие вещества на основе оксидов SiO_2, B_2O_3, P_2O_5, TeO_2, BaO с применением добавок в виде Al_2O_3, MgO, CaO, Na_2O и др. При выборе материала состава стекол необходимо учитывать несколько факторов: окраску, присущую самому стеклу, окраску, вызванную гамма-излучением и устойчивость этой приобретенной окраски при комнатной температуре [10]. Некоторые физические свойства стекол могут быть улучшены с помощью применения определенных добавок в их состав.

Данная работа направлена на исследование радиационно-защитных способностей стекол Y_2O_3-MnO_2-Al_2O_3-SiO_2-CaO при различном массовом составе оксида иттрия Y_2O_3 и оксида марганца MnO_2 [11]. Для этого были рассчитаны параметры экранирования излучения, такие как массовый коэффициент ослабления μ_m (MAC – mass attenuation coefficient), линейный коэффициент ослабления μ (LAC – linear attenuation coefficient), слой половинного ослабления $\Delta_{0,5}$ (HVT – half value thickness), средняя длина свободного пробега (MFP – mean free path), эффективный атомный номер (Z_{eff} – effective atomic number) в диапазоне энергий 0,1218-1,4580 МэВ.

Материалы и методика эксперимента

В данной работе рассматриваются стекла с различным содержанием составных компонентов (20-x)Y_2O_3-xMnO_2-20Al_2O_3-40SiO_2-20CaO; (x = 5, 10, 15 и 20 моль Данные по химическому составу образцов стекол для оценки их радиационно-защитных характеристик взяты из работы [11] и представлены в табл. 1.

Geant4 – это платформа моделирования процессов прохождения элементарных частиц через вещество на основе кода Монте-Карло. Он используется во многих областях, связанных с использованием ядерной энергии и т. д. [12]. В данной работе Geant4 использовался для моделирования прохождения гамма-лучей через исследуемые образцы стекол. При моделировании в Geant4 были взяты стеклянные образцы YM1, YM2, YM3, YM4 в виде кубов с ребрами 5 см (рис. 1).

Таблица 1 – Химический состав исследуемых образцов стекол

Образец	Химическая формула	Химический состав каждого образца (мол.%)					
		Al	Si	Ca	Y	Mn	O
YM1	$15Y_2O_3$-$5MnO_2$-$20Al_2O_3$-$40SiO_2$-20CaO	0,1150	0,1197	0,0854	0,2842	0,0293	0,3665
YM2	$10Y_2O_3$-$10MnO_2$-$20Al_2O_3$-$40SiO_2$-20CaO	0,1242	0,1293	0,0922	0,2046	0,0632	0,3866
YM3	$5Y_2O_3$-$15MnO_2$-$20Al_2O^3$-$40SiO_2$-20CaO	0,1350	0,1405	0,1002	0,1112	0,1030	0,4101
YM4	$20MnO_2$-$20Al_2O_3$-$40SiO_2$-20CaO	0,1478	0,1538	0,1098	0	0,1505	0,4382

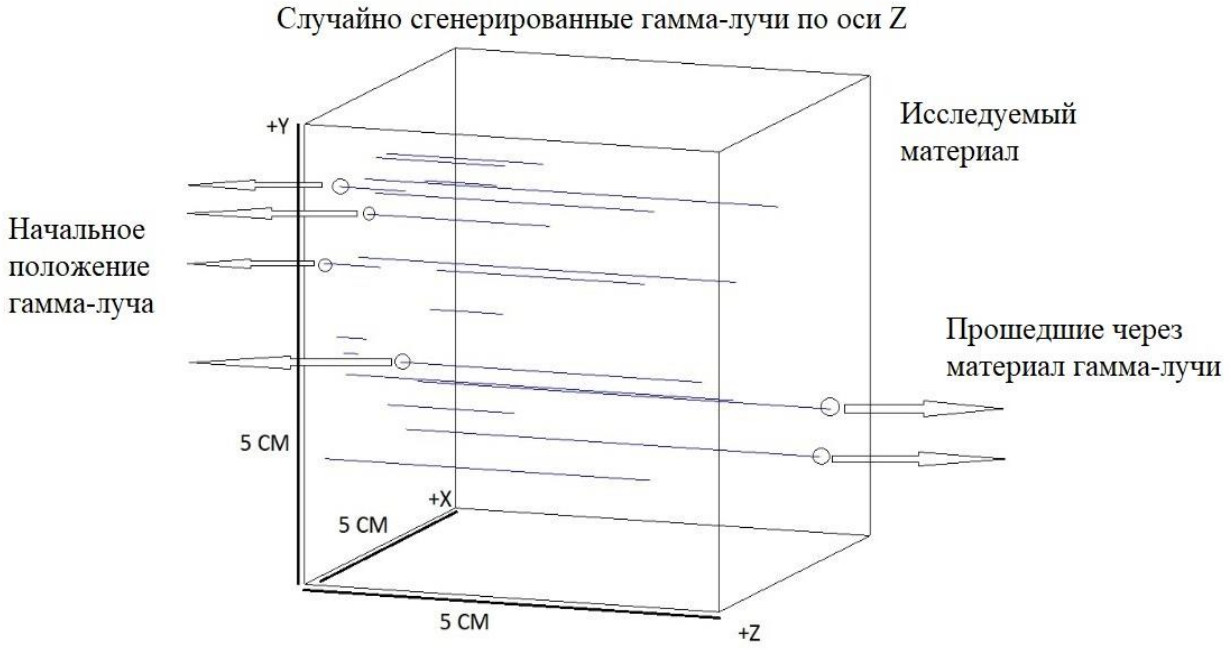


Рисунок 1 –Геометрия расчета исследуемого образца

После того как материалы были смоделированы в соответствии с соотношениями элементов и соединений, расчетный код случайным образом генерирует гамма-лучи, начиная с обратной стороны куба вдоль оси z (рис. 1). Чтобы получить статистически значимые результаты, для каждой энергии генерируется 10^6 гамма-лучей. В конце моделирования для расчета коэффициентов затухания использовались неизмененные гамма-лучи, которые достигали передней стороны куба без каких-либо взаимодействий.

Теоретические основы

Параметры радиационной защиты гамма-излучения необходимо рассчитать для определения защитных характеристик выбранных стекол. Массовый коэффициент ослабления (μ_m) и линейный коэффициент ослабления (μ) являются основными параметрами защиты, они используются для оценки способности

исследуемых композитов ослаблять падающее гамма-излучение. определяемыми следующими уравнениями (1) и (2):

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \quad (1)$$

где $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i$ – массовый коэффициент ослабления i-го составного элемента, w_i – массовая доля i – го составного элемента.

$$\mu = -\frac{1}{x}\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (2)$$

где I_0 – интенсивность радиоактивного источника без экранирующего материала, I – интенсивность радиоактивного источника с экранирующим материалом, x – толщина экранирующего поглотителя (см).

Слой половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$) представляет собой необходимую толщину экранирующего материала для уменьшения интенсивности излучения до половины от его начального значения [13]. Образец, обладающий лучшими характеристиками, такими как слой половинного ослабления (HVT) и средней длины свободного пробега (MFP) является наиболее эффективным для радиационной защиты. Данные параметры рассчитываются с использованием линейного коэффициента ослабления, как указано в уравнениях 3, 4 соответственно:

$$\mathrm{H}VT = \frac{ln2}{\mu} \quad (3)$$

$$\mathrm{MFP} = \frac{1}{\mu} \quad (4)$$

где μ – линейный коэффициент ослабления.

Эффективный атомный номер (Z_{eff}) был вычислен с помощью уравнения (5) следующим образом [14]:

$$Z_{eff} = \frac{\sum_i f_i A_i (\mu_m)_i}{\sum_j \frac{A_j}{Z_j} (\mu_m)_j} \quad (5)$$

где A_i – атомная масса i-го составного элемента, f_i – массовую долю i-го элемента, Z_i – атомный номер i-го элемента, $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i$ – массовый коэффициент ослабления i-го составного элемента образца стекла соответственно.

Аналогично, эффективная электронная плотность вычисляется с помощью уравнения (6), основанного на уравнении (5) [15]:

$$N_{eff} = N_a \frac{Z_{eff}}{< A >} \quad (6)$$

где $< A >= \sum_i A_i f_i$ – средняя атомная масса, N_a – число Авогадро.

Результаты и обсуждение

Характеристики экранирования гамма-излучения были смоделированы для четырех исследуемых образцов в диапазоне энергий 0,1218-1,4580 МэВ. Массовый коэффициент ослабления и другие экранирующие свойства рассчитаны теоретически с использованием программы Phy-x и Geant4.

На (рис. 2, *б*) показаны сравнения значений линейного коэффициента ослабления, полученных с использованием программного обеспечения Phy-X и системы библиотек для компьютерного моделирования процессов прохождения элементарных частиц через вещество Geant4. Из сравнения видно, что моделируемые и рассчитанные значения схожи друг с другом в области высоких энергий, что подтверждает достоверность процессов моделирования. В диапазоне энергий 0,122-0,22 МэВ наблюдается расхождение полученных результатов с помощью моделирования в Geant4 и расчета в Phy-X на 20%.

Значения линейного коэффициента ослабления достигают максимума при низкой энергии гамма-фотонов 0,122 МэВ где преобладает фотоэлектрическое взаимодействие и находятся в диапазоне между 1,0109 см$^{-1}$ и 0,5655 см$^{-1}$ для исследуемых образцов YM1 и YM4. Дальнейшее увеличение энергии падающего гамма-излучения приводит к быстрому снижению линейного коэффициента ослабления из-за фотоэлектрического взаимодействия, поперечное сечение взаимодействия которого пропорционально $E^{-3.5}$ [16].

При энергии гамма-излучения в диапазоне от 0,27 МэВ до 1,45 МэВ наблюдалось постепенное уменьшение значения линейного коэффициента ослабления с увеличением энергии падающего гамма-излучения, что связано с преобладанием комптоновского рассеяния. Более низкие значения линейного коэффициента ослабления достигаются при энергиях выше 1,45 МэВ. По результатам исследования самое наибольшее значение LAC в диапазоне энергий 0,6617-1,4580 МэВ получено для образца YM3 (содержание MnO_2 15 масс.%).

Также были рассчитаны значения массового коэффициента ослабления для выбранных образцов стекол (рис. 2, *а*). Из расчетов видно, что массовый коэффициент ослабления исследуемых образцов уменьшается при увеличении энергии фотонов. Это уменьшение связано с комптоновским рассеиванием, имеющим сечение пропорционально E^{-1} [17]. Образец YM1 имеет самый высокий μ_m в энергетической области 0,1218-0,4440 МэВ, это связано с преобладанием фотоэлектрического взаимодействия в этой низкоэнергетической области. При энергиях выше 0,1218 МэВ массовые коэффициенты ослабления начинают резко снижаться из-за проявления комптоновского рассеяния. Согласно результатам, полученным с помощью моделирования в Geant4, μ_m образца YM3 имеет большие значения среди всех исследуемых стекол при значении энергии от 0,3443 МэВ до 0,6617 МэВ. Массовый коэффициент ослабления YM4 имеет наибольшее значение в диапазоне энергий 0,7789-1,458 МэВ.

Одними из основных параметров радиационной защиты являются слой половинного ослабления и средняя длина свободного пробега. Данные параметры были рассчитаны на основе линейного коэффициента ослабления и представлены на (рис. 3). Слой половинного ослабления является основным параметром, который указывает на необходимую толщину материала для снижения уровня излучения на половину [18]. Согласно результатам Geant4 слой половинного ослабления и средняя длина свободного пробега увеличиваются по мере увеличения энергии гамма-излучения. Образец стекла YM1 имеет наименьшее значение слоя половинного ослабления и средней длины свободного пробега при энергии от 0,1218 до 0,2447 МэВ. Образец стекла YM2 имеет наименьшие значения данных параметров в диапазоне энергий 0,283-0,444 МэВ, а YM3 имеет наименьшее значения слоя половинного ослабления и средней длины свободного пробега в диапазоне энергий 0,662-1,458 МэВ. Образец стекла YM4 имеет наибольшие показатели данных параметров на всем исследуемом диапазоне энергий, что говорит о его худших радиационно-защитных свойствах, по сравнению с другими исследуемыми образцами стекол.

Значения эффективного атомного номера (Z_{eff}) были получены с помощью программного обеспечения Phy-x. Полученные значения эффективного атомного номера приведены на (рис. 3, *а*). Образец стекла YM1 имеет самое высокое значение эффективного атомного номера на всем исследуемом диапазоне энергий, при этом образец стекла YM4 имеет наименьшее значения эффективного атомного номера на данном диапазоне. Из (рис. 3, *а*) видно, что значения эффективного атомного номера уменьшаются с увеличением энергии фотона в диапазоне энергий от 0,1218 до 0,4440 МэВ. При энергиях выше 0,4440 МэВ значения эффективного атомного номера приобретают постоянное значение, что связано с доминированием комптоновского рассеяния в этом энергетическом диапазоне [19]. Эффективная

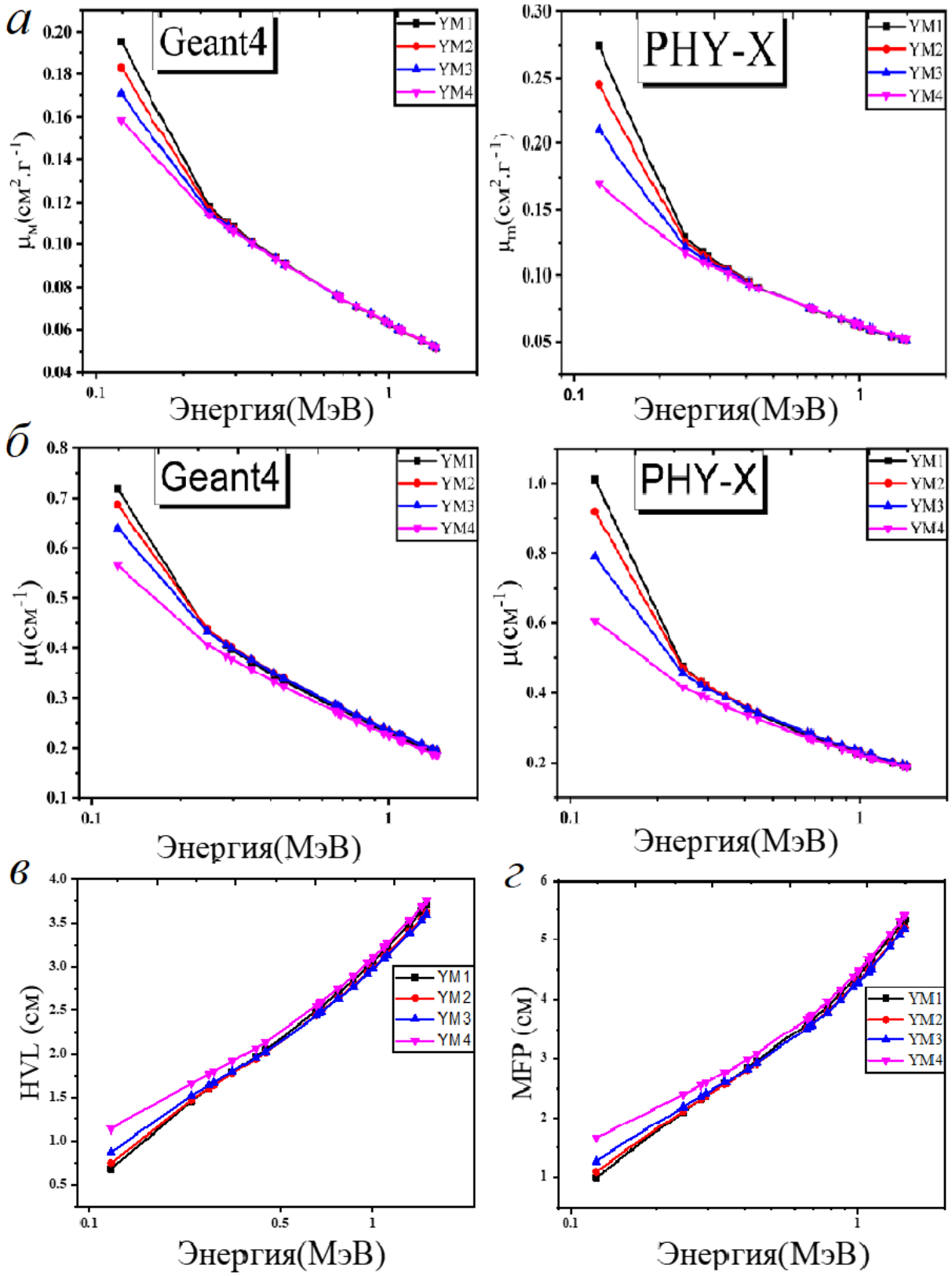


Рисунок 2 – Защитные характеристики образов стекол YM1-YM4:
а – массовый коэффициент ослабления; *б* – линейный коэффициент ослабления; *в* – слой половинного ослабления; *г* – средний свободный путь

электронная плотность исследуемых стекол рассчитана и приведена на (рис. 3, *б*). Значения эффективного атомного номера резко снижаются от начала исследуемого диапазона до энергии 0,2835 МэВ. При энергиях свыше 0,2835 МэВ значения эффективного атомного номера приобретают постоянные значения. Образец стекла YM1 обладает самыми высокими значениями эффективного атомного номера в диапазоне энергий 0,1218-0,444 МэВ, при энергиях больше 0,6617 МэВ образец стекла YM4 обладает самыми высокими значениями эффективного атомного номера среди исследуемых стекол.

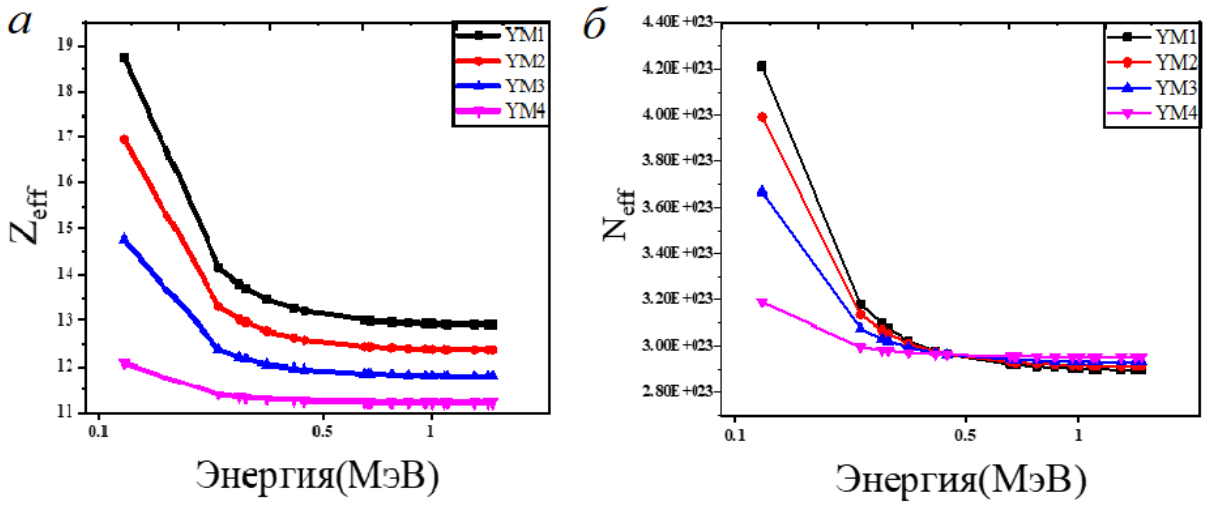


Рисунок 3 – Эффективный атомный номер (*а*) и эффективная электронная плотность (*б*) исследуемых стекол

Заключение

С помощью программного обеспечения Phy-X и платформы моделирования процессов прохождения элементарных частиц через вещество Geant4 в диапазоне энергий от 0,1218 до 1,4580 МэВ были исследованы радиационно-защитные способности стекол с различным содержанием составных компонентов (20-x)Y_2O_3-xMnO_2-20Al_2O_3-40SiO_2-20CaO; (x = 5, 10, 15 и 20 моль%). Рассчитанные параметры радиационной защиты, такие как массовый коэффициент ослабления и линейный коэффициент ослабления исследуемых стекол (YM1-YM4) уменьшаются по мере увеличения энергии фотонов.

Образец стекла YM4 с наибольшим содержанием MnO_2 имеет максимальное значение коэффициента массового ослабления в области энергий от 0,678 МэВ до 1,458 МэВ и колеблется от 0,076 см^2/г до 0,052 см^2/г. Аналогично можно сказать про линейный коэффициент ослабления, по результатам исследования самое наибольшее значение линейного коэффициента ослабления в диапазоне энергий 0,6617-1,4580 МэВ получено для образца YM3 (содержание MnO_2 15 масс.%).

Слой половинного ослабления и средняя длина свободного пробега увеличивается по мере увеличения энергии фотонов. Наилучшие показатели данных характеристик имеет образец стекла YM3 в диапазоне энергий 0,662-1,458 МэВ. Значения для слоя половинного ослабления варьировались от 2,43 см до 3,59 см, а для средней длины свободного пробега от 3,513 см до 5,189 см при данном диапазоне энергий.

Результаты показали эффективность добавления MnO_2 и Y_2O_3 в состав стекол для улучшения их радиационно-защитных свойств. Среди исследуемых вариантов стекол образцы YM3 и YM4 обладают наилучшими радиационно-защитными свойствами.

Исследование стекол в качестве радиационной защиты является весьма перспективным мероприятием и будет продолжено в дальнейшем.

Библиографический список

1. Наумов А. А. Минимизация дозовых затрат при ремонтном обслуживании систем и оборудования АЭС / А. А. Наумов, О. Л. Ташлыков // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. – № 1. – С. 80–88.
2. Новиков Г. А. Обеспечение безопасности в области использования атомной энергии : учебник / Г. А. Новиков, О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 552 с. – ISBN 978-5-7996-2125-4.
3. Машкович В. П. Защита от ионизирующих излучений / В. П. Машкович, А. В. Кудрявцева. – Москва : Энергоатомиздат, 1995. – 495 с.
4. Михайлова А. Ф. Пути реализации принципа оптимизации в радиологической защите персонала / А. Ф. Михайлова, О. Л. Ташлыков // Ядерная физика и инжиниринг. – 2018. – Т. 9, № 4. – С. 393–401.
5. Оптимизация состава гомогенных радиационно-защитных материалов применительно к планируемым условиям облучения / О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин, И. М. Русских [и др.] // Атомная энергия. – 2016. – Т. 121, № 4. – С. 233–236.
6. Tailor made barium borate doped Bi_2O_3 glass system for radiological protection / O. L. Tashlykov, M. I. Sayyed, K. A. Mahmoud [et al.] // Radiation Physics and Chemistry. – 2021. – Vol. 187. – P. 109558.
7. The radiation-shielding properties of ternary SiO_2–SnO–SnF_2 glasses: Simulation and theoretical study / F. I. El-Agawany, O. L. Tashlykov, K. A. Mahmoud, Y. Rammah // Ceramics International. – 2020. – Vol. 46, Iss. 15. – P. 23369–23378.
8. Repercussions of yttrium oxides on radiation shielding capacity of sodium-silicate glass system: experimental and Monte Carlo simulation study / O. L. Tashlykov, S. G. Vlasova, I. S. Kovyazina, K. A. Mahmoud // The European Physical Journal Plus. – 2021. – Vol. 136. – P. 428.
9. Tailor made barium borate doped Bi_2O_3 glass system for radiological protection / O. L. Tashlykov, K. A. Mahmoud, S. G. Vlasova [et al.] // Radiation Physics and Chemistry. – 2021. – Vol. 187. – P. 109558.
10. Стефенсон Р. Введение в ядерную технику / Р. Стефенсон. – Москва : Гос. изд-

во техн.-теорет. лит., 1956. – 494 с.
11. Bansal N. G. Braunite phase embedded Y_2O_3-MnO_2-Al_2O_3-CaO-SiO_2 glass ceramics and their properties / N. Bansal, G. Kaur, K. Singh // Materials Research Bulletin. – 2018. – Vol. 98. – P. 34–40.
12. GEANT4-a simulation toolkit / S. Agostinelli, J. R. Allison, K. Amako [et al.] // Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2003. – Vol. 506, Iss. 3. – P. 250–303. – URL: https://geant4.web.cern.ch/ (date of access: 13.01.2021).
13. Photon cross-section measurements at low energies in some bromides / A. T. L. Tan, V. Lakshminarayana, I. S. Giles, A. Rajaratnam // Il Nuovo Cimento A. – 1988. – Vol. 99, Iss. 5. – P. 587–594.
14. Спайерс В. Эффективный атомный номер и поглощение энергии в тканях / В. Спайерс // Британский журнал радиологии. – 1946. – Т. 19. – С. 52–63. – URL: https://ru.qaz.wiki/wiki/Effective_atomic_number (дата обращения: 13.01.2021).
15. Photon mass attenuation coefficients, effective atomic numbers and electron densities of some thermoluminescent dosimetric compounds / S. Gowda, S. Krishnaveni, T. Yashoda [et al.]. – DOI 10/1007/BF02704481 // Pramana. – 2004. – Vol. 63, Iss. 3. – P. 529–541.
16. Gamma-ray attenuation coefficients and transmission thickness of high consistency heavyweight concrete containing mineral admixture / H. S. Gökçe, B. C. Ozturk, N. F. Cam [et al.] // Cement and Concrete Composites. – 2018. – Vol. 92. – P. 56–69.
17. Evaluation of nuclear radiation shielding competence for ternary Ge–Sb–S chalcogenide glasses / F. I. El-Agawany // Applied Physics A. – 2020. – Vol. 126. – P 258.
18. Calculation of gamma-ray attenuation parameters for locally developed shielding material / R. Biswas, H. Sahadath, A. S. Mollah, Md. F. Hug // Journal of Radiation Research and Applied Sciences. – 2016. – Vol. 9, Iss. 1. – P. 26–34.
19. Investigations of radiation shielding using Monte Carlo method and elastic properties of PbO-SiO_2-B_2O_3-Na_2O glasses / S. A. Issa, Y. B. Saddeek, H. O. Tekin [et al.] // Current Applied Physics. – 2018. – Vol. 18. – P. 717–727.

УДК 621.039.7

Бессонов И.А., Чалпанов С.В., Лезов А.Д., Ташлыков О.Л., Климова В.А., Морданов С.В., Хомяков А.П., Ремез В.П.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОРБЕНТОВ ДЛЯ ИОНОСЕЛЕКТИВНОЙ ОЧИСТКИ

Аннотация. Проведен эксперимент с измерением гидравлического сопротивления слоя сорбента, а затем в пакете вычислительной гидродинамики SolidWorks Flow Simulation (SW FS) проведено компьютерное моделирование течения среды через сорбенты с теми же свойствами, что и в эксперименте. Представлено сравнение результатов эксперимента и моделирования, сделан вывод о возможности использования SW FS для дальнейшей оптимизации фильтр-контейнеров.

Ключевые слова: гидравлическое сопротивление, сорбент, SolidWorks Flow Simulation, фильтр-контейнер.

Abstract. An experiment was carried out with the measurement of the sorbent layer hydraulic resistance, and then a computer simulation of the water flow through sorbents with the same properties as in the experiment was carried out with the computational hydrodynamics package SolidWorks Flow Simulation (SW FS). Comparison of the results of experiment and simulation is presented, it is concluded that it is possible to use SW FS for further optimization of filter containers.

Keywords: hydraulic resistance, sorbent, SolidWorks Flow Simulation, filter container.

Введение

Образование радиоактивных отходов (РАО) является специфической особенностью функционирования АЭС. Поэтому решение проблемы экологически безопасного обращения с РАО, наряду с обеспечением безопасной эксплуатации АЭС, является основным условием приемлемости атомной энергетики как надежного источника, обеспечивающего устойчивое развитие человечества [1].

С 2013 г на АЭС России реализуется стратегия, предусматривающая уменьшение образования, переработку и приведение всех РАО в соответствие с критериями приемлемости, которые установлены НП-093-14 [2].

Жидкие радиоактивные отходы (ЖРО) образуются при работе реакторных установок, дезактивации оборудования, помещений и спецодежды [3]. ЖРО представляют собой гомогенные или гетерогенные смеси (пульпы, эмульсии, суспензии) в кислом или щелочном состоянии. Эксплуатационные ЖРО загрязнены продуктами деления (цезий, стронций, йод), радионуклидами коррозионного происхождения (кобальт, никель, марганец), веществами,

используемыми для поддержания водно-химического режима и дезактивации оборудования [4-6].

Радиоактивные вещества в растворах кубовых остатков находятся в виде ионов, нейтральных молекул и коллоидных частиц. Основными радионуклидами в кубовых остатках являются $^{134,\ 137}Cs$, ^{60}Co, ^{54}Mn. Для изотопов цезия характерна ионная форма. Радионуклиды кобальта и марганца в кубовых остатках находятся в форме комплексов с соединениями, которые используются для дезактивации оборудования (щавелевая, муравьиная, лимонная и этилендиаминтетрауксусная (ЭДТА) кислоты).

Кобальт является наиболее радиационно-опасным элементом в составе конструкционных материалов АЭС [7]. Из ^{59}Co образуется ^{60}Co с высокой энергией гамма-квантов (~1,2 МэВ), и большим периодом полураспада (5,272 года). Кобальт-60 и цезий-137 определяют радиационный фон при демонтаже выводимых из эксплуатации блоков АЭС после останова и длительной выдержки [8, 9].

Основной задачей при обращении с ЖРО является окончательная изоляция кондиционированных РАО. Среди методов кондиционирования наибольшее сокращение объемов ЖРО происходит при селективной сорбции (табл. 1). Это определяет её преимущества и позволяет сконцентрировать радионуклиды в небольшом объеме сорбента [10].

Таблица 1 – Коэффициенты сокращения объемов ЖРО при переработке различными методами

Цементиро-вание	Битумиро-вание	Глубокое упарива-ние	Остекло-вывание	Селектив-ная сорбция
0,9-1,3	1,5-2,5	2-3	3-4	70-90

Процесс очистки ЖРО на установке ионоселективной очистки (ИСО) включает в себя: предварительную фильтрацию и подготовку исходного раствора, озонирование, фильтрацию и селективную сорбцию на ферроцианидных сорбентах в фильтрах-контейнерах (ФК). Конечными продуктами переработки являются очищенный от радионуклидов солевой раствор, отработавший сорбент в ФК, шлам с фильтров, образующийся в результате озонирования (объемная активность находится на уровне исходных ЖРО) [11].

Для эффективной работы сорбционных фильтров необходимо предварительно разрушить органические комплексоны, в первую очередь кобальта-60, с помощью озонирования.

Разработанная специалистами НПП «ЭКСОРБ» технология COREBRICK™ позволяет последовательно проводить кондиционирование ЖРО и хранить отвержденные отходы с соблюдением требований безопасности для окружающей среды. В основе технологии лежит двухстадийная сорбция с применением уникальных сорбентов, разработанных в НПП «ЭКСОРБ» [11].

Высокая вариативность сорбционных свойств и селективности к различным радионуклидам, а также возможность менять физико-химические параметры сорбентов в зависимости от требований конкретного технологического процесса, позволяют эффективно решать вопросы очистки ЖРО практически любого состава.

Процесс ИСО с использованием сорбентов НПП «ЭКСОРБ» включает следующие этапы: раскачку ЖРО; добавление мелкодисперсного сорбента; перемешивание в течение 1-2 часов (сорбция в статическом режиме); отделение шлама с отработанным сорбентом; сорбцию в динамическом режиме с использованием фильтр-контейнера COREBRICK™ с гранулированным сорбентом. При этом исключается стадия озонирования, не требуется нагревание ЖРО.

На стадии статической сорбции из ЖРО удаляется до 95% активности, оставшиеся 5% извлекаются в динамическом режиме либо на второй стадии статической сорбции. Распределением активности между шламом и фильтр-контейнерами можно управлять для минимизации количества образующихся отходов соответствующего класса.

Очищенный раствор направляется на упаривание для получения нерадиоактивного солевого плава. Шлам, содержащий сорбент, отделяется на штатном оборудовании установки ионоселективной очистки, хорошо цементируется со степенью включения до 40%. Получающийся цементный компаунд соответствует требованиям нормативных документов [2].

Важным условием реализации данной технологии является обеспечение радиационной безопасности. Более 20 лет специалисты кафедры «Атомные станции и ВИЭ» УрФУ ведут работы по различным направлениям практической реализации принципа оптимизации в радиационной защите персонала [12]. Проведен ряд расчетно-экспериментальных исследований [13], [14] различных материалов с целью оптимизация радиационной защиты фильтр-контейнеров, содержащих сорбент, насыщенный радионуклидами.

Целью данной работы является разработка компьютерной модели пористого слоя сорбентов, которые используются при кондиционировании ЖРО как фильтрующий материал. Модель пористого слоя войдет в состав расширенной модели, предназначенной для исследования гидродинамики течения в установке ионоселективной очистки.

Для решения поставленных задач мы воспользуемся методами экспериментального определения гидродинамического сопротивления пористого слоя и методами моделирования в пакете вычислительной гидродинамики SolidWorks Flow Simulation.

Теоретическое обоснование

Текучая среда (жидкость или газ) движется через неподвижный слой зернистого материала, проходя в свободном объеме по каналам между твердыми частицами. Движение характеризуется периодическими сужениями и расширениями отдельных струй, на которые разделяется поток среды при входе в пористый слой, и извилистостью пути струй по поровым каналам.

Характер движения потока в слое, частота сужений и расширений отдельных струй, а также их извилистость определяются размером и шероховатостью частиц слоя зернистого материала, их фракционным составом, формой и упорядоченностью укладки, величиной объема пустот между частицами, влиянием стенок аппарата, физическими параметрами потока (плотность, вязкость).

Важнейшей характеристикой слоя является его порозность или доля свободного объёма ε:

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{п}}}{V} = 1 - \frac{V_{\text{ч}}}{V}, \quad (1)$$

где V – объем слоя; $V_{\text{п}}$ – суммарный объем поровых каналов в слое; $V_{\text{ч}}$ – суммарный объем твердых частиц в слое.

Сорбенты, рассматриваемые в данной работе, состоят из частиц неодинакового размера и формы. При проведении гидродинамических расчетов для таких слоев обычно используют зависимости для монодисперсного слоя шаровых частиц. При этом вычисляют средний диаметр частиц, который определяется как средневзвешенная величина по весовому содержанию x_i частиц диаметром d_i:

$$d = \frac{1}{\sum(x_i/d_i)}. \quad (2)$$

Частицы не шарообразной формы характеризуются эквивалентным диаметром:

$$d_{\text{ч}} = d_{\text{рш}} \cdot \varphi. \quad (3)$$

где: $d_{\text{рш}}$ – диаметр равновеликого по объему (весу) шара, м; φ – коэффициент формы, равный отношению поверхности равновеликого по объему шара к поверхности частицы [15].

Скоростью фильтрации, или фиктивной скоростью, называют среднюю скорость потока, отнесенную к поперечному сечению аппарата.

Гидравлическое сопротивление слоя зернистого материала (потеря напора в слое) может быть определено по уравнению Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta P = \lambda \frac{H}{d_к} \frac{w_К^2}{2} \rho, \tag{4}$$

где $w_к$ – скорость потока в сечении поровых каналов; H – высота слоя; $d_к$ – эквивалентный диаметр поровых каналов; ρ – плотность жидкости, кг/м^3; λ – коэффициент гидравлического сопротивления [16].

Скорость потока среды в поровых каналах $w_к$ можно определить через скорость потока среды, рассчитанную на полное сечение слоя w (скорость фильтрации):

$$w_к = \frac{w}{\varepsilon}. \tag{5}$$

Для монодисперсного слоя, состоящего из шаровых элементов диаметром d, эквивалентный диаметр порового канала равен:

$$d_k = \frac{2 \cdot d \cdot \varepsilon}{3 \cdot (1 - \varepsilon)}. \tag{6}$$

С учетом этой зависимости уравнение (4) для расчета гидравлического сопротивления при движении потока в слое зернистого материала можно представить следующим образом

$$\Delta P = \lambda \frac{H}{d} \frac{w^2}{2} \rho \frac{3}{2} \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3}. \tag{7}$$

Коэффициент гидравлического сопротивления λ может быть определен по уравнению:

$$\lambda = \frac{A}{Re} + B, \tag{8}$$

где A и B – коэффициенты, зависящие от условий взаимодействия потока и слоя твердых частиц; Re – число Рейнольдса, которое определяется уравнением:

$$Re = \frac{w_к \cdot d_k \cdot \rho}{\mu}, \tag{9}$$

где μ – динамическая вязкость жидкости, Па с.

Подставив в уравнение (9) выражения для скорости потока в каналах (5) и размера сечения канала (6), получим

$$Re = \frac{2}{3} \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu \cdot (1 - \varepsilon)} = \frac{2}{3 \cdot (1 - \varepsilon)} Re_ч, \tag{10}$$

где $Re_ч$ – число Рейнольдса, вычисленное по среднему диаметру частиц:

$$Re_ч = \frac{\omega \cdot d \cdot \rho}{\mu}. \tag{11}$$

Подставляя в (7) выражение для коэффициента гидравлического сопротивления (8) с коэффициентами A = 134 и B = 2,34, получаем расчетное уравнение, предложенное Эргуном, которое хорошо аппроксимирует экспериментальные данные различных авторов по гидравлическому сопротивлению слоя зернистого материала и рекомендуется для технических расчетов:

$$\frac{\Delta P}{H} = 150\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}\frac{\omega\cdot\mu}{d^2} + 1{,}75\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3}\frac{\rho\cdot\omega^2}{d}. \qquad (12)$$

Для слоя зернистого материала при свободной укладке расчетные значения, полученные по уравнению (12), совпадают с экспериментальными данными с точностью ±25%. Это уравнение не рекомендуется применять для плотных слоев с упорядоченной укладкой или засыпок с повышенной порозностью (ε = 0,6÷0,98), так как при этом уравнение Эргуна занижает значения перепада давления.

Согласно уравнению (12), падение давления при течении через пористый слой, представляет собой сумму потерь на трение за счет сил вязкости (вязкостные потери) и потерь кинетической энергии потока при его движении по каналам между частицами слоя. При малых значениях критерия Рейнольдса потери кинетической энергии потока относительно малы, ими можно пренебречь. Исходя из этого, уравнение (12) примет вид:

$$\frac{\Delta P}{H} = 150\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}\frac{\omega\cdot\mu}{d^2}. \qquad (13)$$

При больших значениях критерия Рейнольдса, наоборот, из-за относительно малой величины потерь на трение можно учитывать только потери кинетической энергии потока. Тогда уравнение (12) примет вид:

$$\frac{\Delta P}{H} = 1{,}75\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3}\frac{\rho\cdot\omega^2}{d}. \qquad (14)$$

Материалы

Для исследования были выбраны три сорбента Научно-производственного предприятия «Эксорб», занимающего ведущее место в производстве сорбентов для ионоселективной очистки в России и мире. Свойства исследуемых сорбентов представлены в табл. 2. Все сорбенты имеют разную форму частиц и значения порозности.

Слой сорбента состоит из множества элементов неправильной формы, имеет сложную и носящую статистический характер геометрическую структуру. Если масштабы течения велики по сравнению с размерами частиц слоя, то его моделируют как квазиоднородную среду с одной обобщенной характеристикой – проницаемостью.

Таблица 2 – Свойства исследуемых сорбентов

Параметр	Образец		
Марка сорбента	СМЕТ	РАЦИР	МОДИКС
Насыпная плотность, кг/м^3	1320	1092	959
Порозность	0,214	0,187	0,234
Истинная плотность, кг/м^3	1681	1343	1252
Средний размер частиц, мм	0,9	0,8	1,4
Микрофотография частиц сорбентов, размер масштабной сетки – 0,1 мм			

Сорбент СМЕТ является неорганическим сорбентом на основе сульфидов меди. Представляет собой микрочастицы сульфидов меди, химически закреплённые на гранулах природного алюмосиликата (опала). Пористый носитель в составе сорбента обеспечивает большую доступность сорбционных центров, что повышает ёмкость сорбента на единицу массы сорбирующего вещества и улучшает кинетику сорбции. Сульфид меди извлекает из водных растворов ионы сурьмы, ртути, мышьяка, кадмия, кобальта и серебра. Может работать в растворах с солесодержанием до 500 г/дм^3.

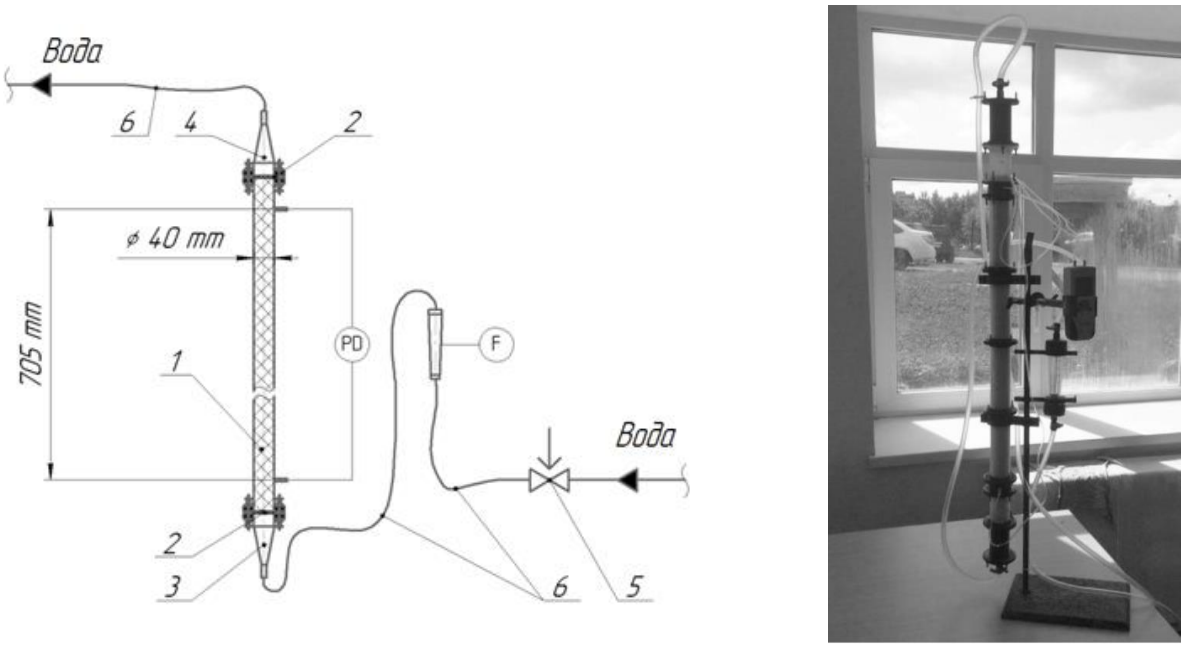
Сорбент МОДИКС является неорганическим сорбентом на основе диоксида марганца. Носителем для сорбирующего вещества в композиционном сорбенте служит природный алюмосиликат (опал). Диоксид марганца извлекает из водных растворов ионы стронция, плутония, урана, дочерние продукты распада радона.

Сорбент РАЦИР является неорганическим сорбентом на основе гидроксида циркония. Представляет собой микрочастицы гидроксида циркония, химически закреплённые на гранулах природного алюмосиликата (опала). Пористый носитель в составе сорбента обеспечивает большую доступность сорбционных центров, что повышает ёмкость сорбента на единицу массы сорбирующего вещества и улучшает кинетику сорбции. Химическая формула сорбирующего

вещества $ZrO_x(OH)_y$, где x = 0…1, y = 2…4. Гидроксид-оксид циркония извлекает из водных растворов ионы поливалентных металлов, в том числе свинца и висмута, ионы кремния, железа, марганца, сурьмы. Применяется для очистки от продуктов распада радона и альфа-излучающих радионуклидов.

Экспериментальное исследование

Для определения гидродинамического сопротивления исследуемых образцов была спланирована серия экспериментальных исследований течения через слой сорбента на установке, показанной на рис. 1. Целью экспериментального исследования было получение зависимости гидродинамического сопротивления слоя от скорости течения воды через слой.



а) б)

Рисунок 1 – Экспериментальная установка: а) схема установки; б) фотография колонны; 1 – колонна с сорбентом; 2 – фильтры; 3 – входная камера; 4 – выходная камера; 5 – регулирующий клапан; 6 – гибкие трубопроводы; PD – дифференциальный манометр; F – расходомер

Поток жидкости входит в колонну экспериментальной установки через входную камеру (3) с начальным давлением p_0 и проходит через слой сорбента. Сорбент размещается внутри колонны и удерживается фильтрами (2), установленными с обоих концов слоя сорбента. При прохождении потока через слой сорбента его давление снижается из-за сопротивления среды и принимает значение p_1. Значение перепада давления на входе и выходе из слоя сорбента регистрируется дифференциальным манометром (*PD*). В данной серии

экспериментов использовался цифровой манометр HT-1890, обладающий инструментальной погрешностью 0,3%. Скорость потока регулируется с помощью клапана (5). Расход жидкости, прошедшей через колонну, измеряется с помощью ротаметра LZS-15.

С каждым сорбентом экспериментальное исследование проводилось пять раз с одинаковым расходом жидкости для определения погрешности измерения. После проведения необходимого количества измерений расход жидкости увеличивался на 10 л/ч. В ходе выполнения эксперимента были получены результаты, представленные на рисунке 2.

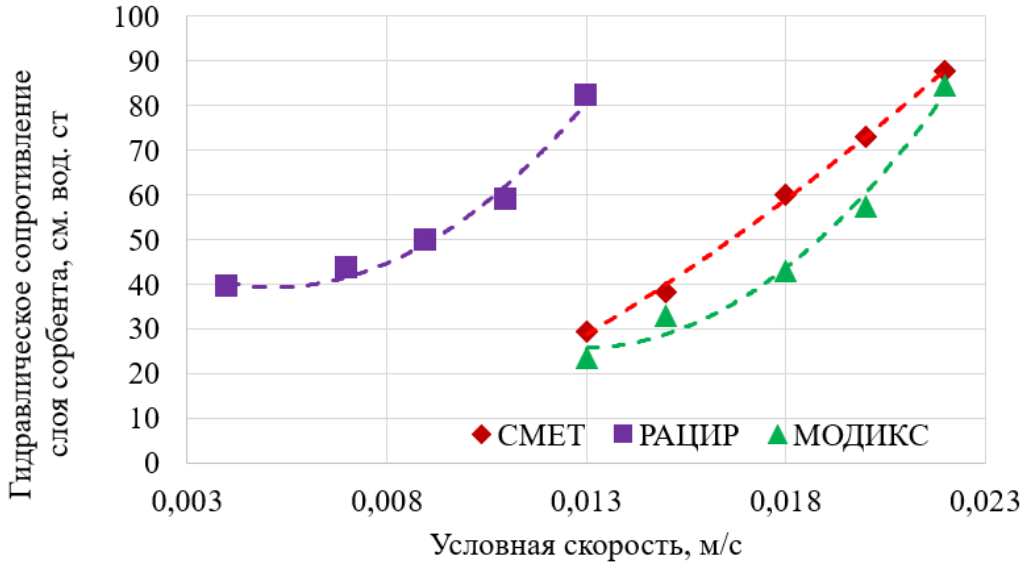


Рисунок 2 – Результаты экспериментального исследования гидравлического сопротивления слоя сорбентов

Из результатов эксперимента видно, что гидравлическое сопротивление слоя увеличивается по квадратичной зависимости от скорости потока, что согласуется с уравнением Эргуна (12).

По графику можно заметить, что интервал скоростей для сорбента «РАЦИР» отличается от других сорбентов. Это связано с низкой порозностью сорбента, следствием чего стало высокое гидравлическое сопротивление слоя. Измеряемый перепад давления превышал предел измерения манометра, поэтому было необходимо снизить скорость течения.

Моделирование течения через пористую среду

В программном комплексе SolidWorks Flow Simulation пористая среда моделируется как распределенное по объему сопротивление течению. Для создания корректной модели нужно задать для слоя тип проницаемости,

порозность и зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления от параметров течения (перепада давления в слое, скорости или расхода жидкости, линейных размеров слоя, размера поры и других). Можно выбрать комбинацию параметров, наилучшим образом подходящую для условий конкретного моделирования.

Значение гидродинамического сопротивления в программном комплексе вычисляется по формуле:

$$k = -\frac{grad(p)}{\rho \cdot w}, \tag{15}$$

Коэффициент k задается в виде эмпирической зависимости перепада давления от скорости потока.

Получить характеристики сопротивления пористой среды можно двумя способами.

Первый – создать твердотельную модель небольшой части слоя частиц и рассчитать характеристики течения через этот слой с помощью Flow Simulation. Этот способ подходит для регулярных слоев из элементов правильной формы, что было подтверждено в при моделировании течения через слой шаровых элементов. Однако для слоя частиц неправильной формы невозможно точно воспроизвести все элементы и их взаимное расположение. Приведенный на рис. 3, *а* пример моделирования служит скорее для понимания механизма течения в слое.

Так как моделирование обтекания отдельных частиц не позволяет получить необходимые характеристики слоя, для построения модели слоя использовался второй способ – на основе данных, полученных авторами в ходе экспериментального исследования, описанного выше. Для каждого варианта сорбента задавался в виде табличной зависимости перепад давления при разных скоростях течения. Модель слоя для этого случая показана на рис. 3, б. Слой моделируется как сплошной твердотельный элемент с заданной проницаемостью.

Результаты и их обсуждение

По полученным в результате эксперимента данным были построены модели пористых слоев сорбента, проведено моделирование течения воды через исследуемые сорбенты. В результате моделирования были определены значения разности давления потока до и после слоя сорбента. Полученный перепад давления характеризует гидравлическое сопротивление слоя.

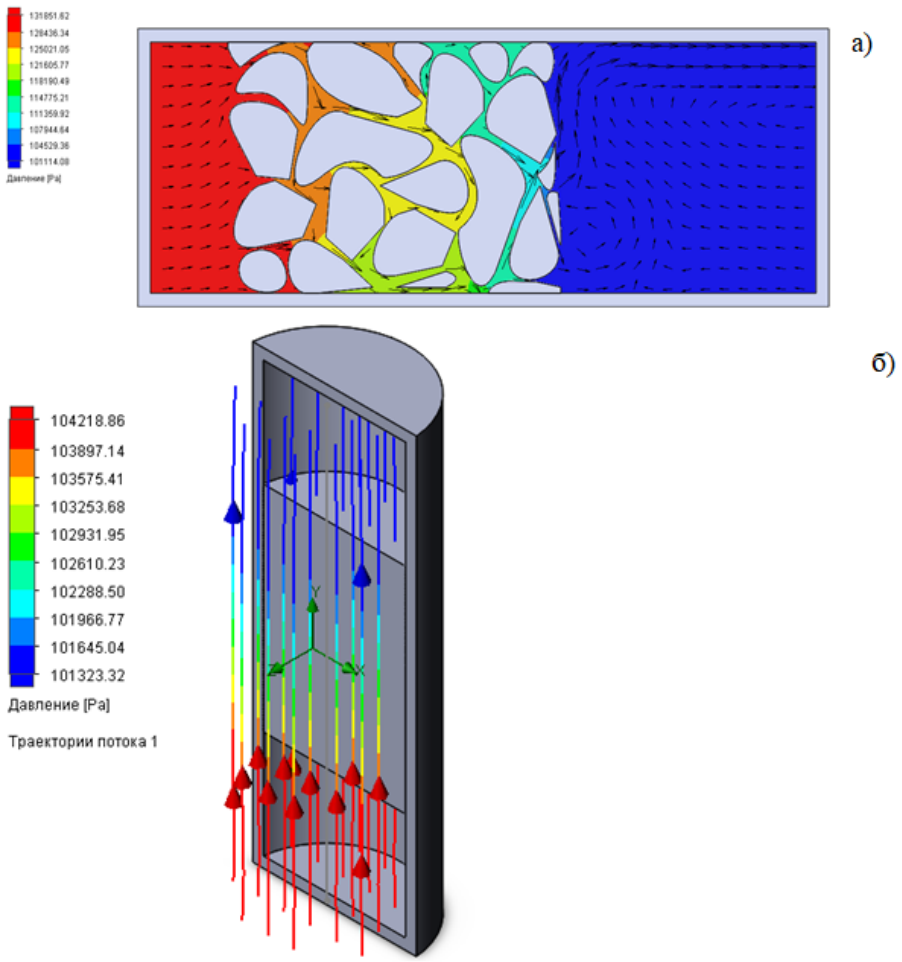


Рисунок 3 – Типы моделирования течения жидкости через пористые среды:
а) отрисовка отдельных элементов слоя сорбента;
б) моделирование течения среды через пористый слой, заданный по результатам эксперимента

Было проведено сравнение результатов моделирования с результатами экспериментов, описанных в данной работе (табл. 3).

Расхождение экспериментальных данных и результатов моделирования не превышает 2,5%, что свидетельствует о том, что данный подход можно использовать для моделирования устройств, конструкция которых включает в себя насыпной слой. К таким устройствам, например, относятся фильтр-контейнеры для улавливания радионуклидов из жидких радиоактивных отходов. Полученные результаты позволят создать расширенную твердотельную модель радионуклидной ловушки и провести оптимизацию конструкции и режимов эксплуатации установки. Это в свою очередь приведёт к более эффективному использованию фильтр-контейнеров, тем самым будут снижены экономические затраты при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии.

Таблица 3 – Сравнение результатов эксперимента и моделирования

Сорбент «СМЕТ»					
Расход, л/ч	60	70	80	90	100
Расхождение, %	0,215	0,053	0,250	0,243	0,251
Сорбент «РАЦИР»					
Расход, л/ч	20	30	40	50	60
Расхождение, %	0,386	0,230	0,237	0,227	0,247
Сорбент «МОДИКС»					
Расход, л/ч	60	70	80	90	
Расхождение, %	0,169	0,260	0,158	2,16	

Заключение

С помощью экспериментального исследования была получена зависимость гидродинамического сопротивления различных сорбентов от скорости потока через слой. Полученные данные положены в основу компьютерной модели, которая позволит провести моделирование различных компоновок устройств для ионоселективной очистки с целью выявления оптимального варианта их конструкции.

Библиографический список

1. Новиков Г. А. Обеспечение безопасности в области использования атомной энергии : учебник / Г. А. Новиков, О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 552 с. – ISBN 978-5-7996-2125-4.
2. НП–093–14. Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения : в ред. приказа Ростехнадзора от 17 нояб. 2017 г. № 481. – Москва : НТЦ ЯРБ, 2017. – 36 с.
3. Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Учебное пособие. В 2 ч. Ч. 1 / А. И. Бельтюков, А. И. Арпенко, С. А. Полуяктов [и др.] ; под общ. ред. С. Е. Щеклеина, О. Л. Ташлыкова. – Екатеринбург : УрФУ, 2013. – 548 с.
4. О проблеме снижения дозовых затрат персонала АЭС / О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин, В. И. Булатов, А. Г. Шастин // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2011. – № 1. – С. 55–60.
5. Ташлыков О. Л. Дозовые затраты персонала в атомной энергетике. Анализ. Пути снижения. Оптимизация : монография / О. Л. Ташлыков. – Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH, 2011. – 232 с.

6. Ташлыков О. Л. Ремонт оборудования атомных станций : учебник / О. Л. Ташлыков. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 352 с. – ISBN 978-5-7996-2381-4.
7. Aniskin Y. N. Technical-economic assessment of low-cobalt content in structural materials // IAEA-TECDOC-667. Coolant technology of water cooled reactors / Y. N. Aniskin, Y. A. Khitrov. – 1992. – Vol. 3 : Activity transport mechanisms in water cooled reactors. – P. 151–154.
8. Особенности вывода из эксплуатации быстрых реакторов БН–350, –600 / Ю. В. Носов, А. В. Ровнейко, О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин // Атомная энергия. – 2018. – Т. 125, № 4. – С. 195–199.
9. Кропачев Ю. А. Оптимизация радиационной защиты на этапе вывода энергоблоков АЭС из эксплуатации / Ю. А. Кропачев, О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2019. – № 1. – С. 119–130.
10. Метод ионоселективной очистки жидких радиоактивных отходов атомных станций / А. Э. Арустамов, А. В. Зинин, П. В. Красников [и др.] // Безопасность жизнедеятельности. – 2005. – № 11. – С. 13–16.
11. Повышение эффективности локализации радионуклидов кобальт-60 и цезий–137 из жидких радиоактивных отходов в решении проблемы обеспечения радиационной безопасности АЭС / В. П. Ремез, О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин [и др.] // Ядерная физика и инжиниринг. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 129–137.
12. Михайлова А. Ф. Пути реализации принципа оптимизации в радиологической защите персонала / А. Ф. Михайлова, О. Л. Ташлыков // Ядерная физика и инжиниринг. – 2018. – Т. 9, № 4. – С. 393–401.
13. Modeling of combined radiation protection when working with irradiation sources / V. Yu. Litovchenko, N. A. Vasutin, A. V. Kozlov [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2313. – P. 020010.
14. Simulation method of the low-Re flows in the packed bed technological equipment / A. P. Khomyakov, S. Mordanov, A. S. Lavrov, D. I. Grinyov. – DOI 10.1088/1757-899X/899X/862/6/062020 // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 862. – P. 062020.
15. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии : учеб. для вузов / А. Г. Касаткин. – 10-е изд., стер., доп. – Москва : Альянс, 2004. – 753 с.
16. Гидромеханические процессы. Руководство к практическим занятиям в лаборатории процессов и аппаратов нефтегазопереработки / Д. Н. Жедяевский, В. Д. Косьмин, В. А. Лукьянов, С. С. Круглов. – Москва : РГУ нефти и газа, 2012. – 60 с.

УДК 537.311.31

Бородин К. И., Волков В. А.

ВЛИЯНИЕ НЕИЗОЭЛЕКТРОННОСТИ КОМПОНЕНТОВ НА ЗАВИСИМОСТЬ ОСТАТОЧНОГО ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ БИНАРНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ ОТ СОСТАВА

Аннотация. В приближении когерентного потенциала проведено численное исследование теоретических кривых «остаточное электросопротивление – состав» в зависимости от степени заполнения электронных зон образующих сплав металлов. Результаты расчетов представлены в графическом виде. Сопоставление теоретических и экспериментальных результатов позволяет сделать вывод, что изоэлектронным сплавам присуще слабое рассеяние, а для неизоэлектронных сплавов характерно «промежуточное» рассеяние. Полученные из рентгеновских спектров значения параметра рассеяния для ряда сплавов подтверждают этот вывод.

Ключевые слова: остаточное электросопротивление, неизоэлектронность, зависимость от состава, неупорядоченные сплавы замещения, приближение когерентного потенциала.

Abstract. In the coherent potential approximation a numerical study of the theoretical curves «residual electrical resistance – composition» depending on the degree of filling of the electronic zones of the metals forming the alloy is carried out. The results of calculations are presented in graphical form. A comparison of theoretical and experimental results allows us to conclude that weak scattering is inherent in isoelectronic alloys, and «intermediate» scattering is characteristic of non-isoelectronic alloys. The values of the scattering parameter obtained from X-ray spectra for a number of alloys confirm this conclusion.

Keywords: residual electrical resistance, non-isoelectricity, composition dependence, disordered substitution alloys, coherent potential approximation.

Введение

Проблема создания высокорезистивных металлических сплавов остается актуальной на протяжении многих лет в силу востребованности последних во многих отраслях промышленности. Поскольку в обычных рабочих диапазонах температур значительную часть электросопротивления составляет остаточное электросопротивление (т.е. сопротивление, обусловленное рассеянием электронных волн на статических нарушениях периодичности решетки – нерегулярностях кулоновского поля в сплавах, дефектах решетки и т.д.), изучение остаточного электросопротивления является важной теоретической и прикладной задачей физики твердого тела.

В работах [5,6] был проведен анализ совокупности экспериментальных данных по электросопротивлению и термоэдс металлических двойных непрерывных твердых растворов (ДНТР). Исследование зависимости остаточного электросопротивления ρ от состава для 21 системы ДНТР выявило

ограниченность применимости известного правила Курнакова – Нордгейма [1], согласно которому зависимость ρ – состав для металлических ДНТР описывается выпуклой симметричной кривой, аппроксимируемой обычно выражением $\rho = \rho_1 \cdot x \cdot (1 - x)$, где ρ_1 не зависит от состава, а x - концентрация металла А. В [5,6] было показано, что правило Курнакова – Нордгейма выполняется для сплавов, образованных изоэлектронными металлами, т.е. металлами, принадлежащими к одной группе периодической системы элементов (ДНТР типа I). Если же ДНТР образованы неизоэлектронными металлами, зависимость ρ – состав всегда изображается несимметричной кривой, на которой могут быть вогнутые участки (ДНТР типа II).

Теоретические исследования, выполненные ранее с помощью теории возмущений в рамках квантовой теории твердого тела, использовали в качестве малого параметра отношение величины хаотического рассеивающего потенциала к ширине зоны проводимости δ и как раз приводили к правилу Курнакова – Нордгейма [1]. Общая теория остаточного сопротивления сплавов с учетом атомного упорядочения, ближнего порядка, искажений кристаллической решетки и т.д. была развита в рамках такого подхода в работах А. А. Смирнова и его сотрудников [1].

Позднее в [2,7] и целом ряде других работ было развито приближение когерентного потенциала (ПКП), которое позволяет описывать свойства концентрированных сплавов в случаях, когда параметр δ не является малым. ПКП использовалось в [8,9,10] для расчета остаточного электросопротивления бинарных и тройных упорядочивающихся сплавов, в [3] для расчета электросопротивления металлов с вакансиями. В работах [4,11] остаточное электросопротивление бинарных неупорядоченных сплавов вычислялось в ПКП, но в них не анализировалось влияние степени заполнения электронных зон образующих сплав металлов на характер зависимости ρ – состав. Но именно эта закономерность была обнаружена при анализе большого числа экспериментальных данных, она послужила основой для предложенной в [5,6] классификации ДНТР на два типа по характеру зависимости ρ – состав.

В данной работе в ПКП мы исследуем влияние неизоэлектронности на характер зависимости ρ – состав и пытаемся дать теоретическое обоснование предложенной в [5,6] классификации ДНТР.

Постановка задачи. Используемая модель и метод её решения

Поскольку в зонной теории изоэлектронность (либо неизоэлектронность) связана с заполнением валентных зон компонентов сплава, мы рассмотрим характер зависимости ρ – состав от степени заполнения валентных зон

компонентов в модели минимальной полярности [12,13], в которой не учитывается перераспределение заряда между атомами разных сортов. При этом будем полагать, что электропроводность образующих сплав металлов осуществляется электронами одной зоны, а объем и ширина валентных зон компонентов равны.

Одноэлектронный гамильтониан неупорядоченного бинарного сплава имеет следующий вид [7]

$$H = V + H_0. \tag{1}$$

Здесь H_0 – трансляционно – инвариантная часть гамильтониана системы, а V – одноузельный хаотический потенциал.

$$H_0 = \sum_{\vec{n}\neq\vec{m}} t_{\vec{n}\vec{m}} a_{\vec{n}}^{+} a_{\vec{m}} = \sum_{\vec{k}} \varepsilon(\vec{k}) a_{\vec{k}}^{+} a_{\vec{k}} \ , V = \sum_{\vec{n}} \varepsilon_{\vec{n}} a_{\vec{n}}^{+} a_{\vec{n}}, \tag{2}$$

где $a_{\vec{n}}^{+}, a_{\vec{n}}$ – операторы рождения и уничтожения электрона на узле $\vec{n}$; $a_{\vec{k}}^{+}, a_{\vec{k}}$ – операторы рождения и уничтожения состояния с квазиимпульсом $\vec{k}$; $t_{\vec{n}\vec{m}}$ – интеграл переноса между узлами $\vec{n}$ и $\vec{m}$, считающийся независимым от состава сплава; $\varepsilon(\vec{k})$ – закон дисперсии; $\varepsilon_{\vec{n}}$ – атомный уровень компонента, находящегося на узле $\vec{n}$, принимающий соответственно значения ε_A или ε_B.

Одноэлектронные функции Грина определяются формулами

$$G(z) = (z - H)^{-1}, G_0 = (z - H_0)^{-1}. \tag{3}$$

Их матричные элементы могут быть записаны в виде

$$\langle \vec{k} | G_0(z) | \vec{k'} \rangle = \frac{\delta_{\vec{k}\vec{k'}}}{z - \varepsilon(\vec{k})}, \tag{4}$$

$$F_0(z) = \langle \vec{n} | G_0(z) | \vec{n} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{D_0(E) dE}{z - E} = \frac{1}{N} \sum_{\vec{k}} (z - \varepsilon(\vec{k}))^{-1}. \tag{5}$$

В формуле (5)

$$D_0(E) = \frac{1}{N} \sum_{\vec{k}} \delta(E - \varepsilon(\vec{k})) = -\frac{1}{\pi} Im F_0(E + i0), \tag{6}$$

где N – число узлов решетки, $D_0(E)$ – плотность электронных состояний, соответствующая трансляционно – инвариантной части гамильтониана H_0.

Запишем эффективный трансляционно – инвариантный гамильтониан сплава

$$H_э(z) = \sum(z) + H_0, \sum(z) = \sum_{\vec{n}} \sigma(z) a_{\vec{n}}^{+} a_{\vec{n}} = \sum_{\vec{k}} \sigma(z) a_{\vec{k}}^{+} a_{\vec{k}}. \quad (7)$$

В этом выражении σ(z) – когерентный потенциал, определяемый из условия равенства нулю усредненной t – матрицы рассеяния $\vec{n}$ – го узла $\langle t_{\vec{n}} \rangle = 0$ [7] или

$$x \cdot \frac{\varepsilon_A - \sigma}{1 - (\varepsilon_A - \sigma)F} + (1 - x) \cdot \frac{\varepsilon_B - \sigma}{1 - (\varepsilon_B - \sigma)F} = 0, \quad (8)$$

где

$$G_э(z) = (z - H_э(z))^{-1}, \langle \vec{k} | G_э(z) | \vec{k'} \rangle = \frac{\delta_{\vec{k}\vec{k'}}}{z - \varepsilon(\vec{k}) - \sigma(z)}, \quad (9)$$

$$F(z) = \langle \vec{n} | G_э(z) | \vec{n} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{D(E) dE}{z - E} = F_0\big(z - \sigma(z)\big), \quad (10)$$

а плотность электронных состояний $D(E)$ задается формулой

$$D(E) = -\frac{1}{\pi} ImF(E + i0). \quad (11)$$

Будем предполагать, что образующие сплав металлы имеют одну валентную зону одинаковой формы и объема; всё отличие состоит в смещении этих зон по оси энергий. Объем зоны нормирован на единицу. Для зоны чистого металла используется полуэллиптическая аппроксимация с полушириной равной единице.

Эти предположения, видимо, можно считать приемлемыми для анализа зависимости ρ – состав, поскольку в эксперименте такие зависимости носят универсальный характер для сплавов различных металлов и, следовательно, не должны сильно зависеть от особенностей зонной структуры компонентов.

Таким образом мы берем

$$D_0(E) = \begin{cases} \frac{2}{\pi}\sqrt{1 - E^2}, & |E| \le 1 \\ 0, & |E| \ge 1 \end{cases}, \quad (12)$$

тогда

$$F_0(z) = 2\left[z - \sqrt{z^2 - 1}\right], \quad (13)$$

$$\sigma(z) = z - \frac{1}{F(z)} - \frac{F(z)}{4}. \quad (14)$$

Формула (14) позволяет исключить из уравнения (8) $\sigma(z)$ и находить параметры эффективной усредненной среды из кубического уравнения для функции $F(z)$

$$F^3(z) - 8zF^2(z) + 16F(z)\left(z^2 + \frac{1}{4}(1 - \delta^2)\right) + 16\left(\delta\left(\frac{1}{2} - x\right) - z\right) = 0, \quad (15)$$

где $z = E + i0$, $d = e_A - e_B > 0$, e_a - центр тяжести плотности электронных состояний металла a .

Тензор статической электропроводности сплава задается формулой Кубо – Гринвуда

$$\sigma^{\alpha\beta} = \frac{\pi e^2 h}{N\Omega} \int dE \left(-\frac{\partial f}{\partial E}\right) Sp\langle v^\alpha \delta(E - H) v^\beta \delta(E - H)\rangle, \quad (16)$$

где e – заряд электрона, Ω – объем, приходящийся на один атом, f – функция Ферми, h – постоянная Дирака, v^α – α – компонента оператора скорости.

В рамках приближений, сделанных в [4,14], для остаточного электросопротивления неупорядоченного сплава из формулы (16) получим

$$\rho = \rho_0 \frac{\Delta(\varepsilon_F)}{\left(D(\varepsilon_F)\right)^2 (6\Delta(\varepsilon_F) + \pi D(\varepsilon_F))}, \ \rho_0 = \frac{12\Omega}{\pi e^2 h v_m^2}, \quad (17)$$

где v_m – максимальная скорость в полосе, $\Delta(E) = |\mathrm{Im}\sigma(E + i0)|$, а энергия Ферми ε_F определяется условием

$$x n_A + (1 - x) n_B = \int_{-\infty}^{\varepsilon_F} D(E) dE. \quad (18)$$

В формуле (18) n_α – количество валентных электронов на атоме сорта α

Алгоритм решения задачи был следующим. Уравнение (15) решалось для выбранных значений параметров x и δ для различных энергий E, что позволяло найти когерентный потенциал $\sigma(E)$ (14) и плотность состояний D(E) (11). Далее из условия (18) для выбранных значений n_A и n_B находилась энергия Ферми ε_F, а затем вычислялось остаточное электросопротивление ρ (17).

Основные результаты

В рамках предложенной модели был проведен расчет зависимости ρ^* – состав ($\rho^* = \rho/\rho_0$) при различных n_A и n_B. При этом значения параметра рассеяния δ были взяты такими, чтобы в описываемых сплавах сохранялся металлический тип проводимости при всех составах. В качестве характерных значений мы взяли $\delta = 0{,}25$ («слабое» рассеяние), а также $\delta = 0{,}5$ и $\delta = 0{,}6$ («промежуточное» рассеяние, $\delta \sim 1$). Для изоэлектронных сплавов ($n_A = n_B = n$) типичные кривые ρ^* – состав приведены на Рис. 1.

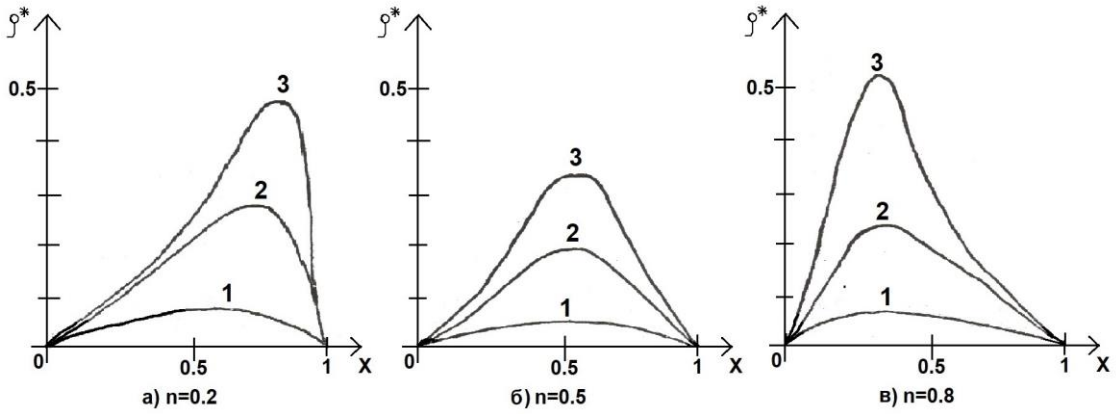


Рисунок 1 – Кривые ρ^* – состав для изоэлектронных сплавов.
$1 - \delta = 0{,}25; 2 - \delta = 0{,}5; 3 - \delta = 0{,}6.$

Аналогичные зависимости для случаев а) и в) были получены в работе [11]. Как видно из Рис. 1, полностью симметричными кривые являются только при наполовину заполненных зонах металлов А и В. При малых значениях параметра рассеяния кривые ρ^* – состав являются всюду выпуклыми и в случаях а), в) обладают очень малой асимметрией. При промежуточном рассеянии кривые ρ^* – состав не всегда выпуклы и в случаях а), в) имеют значительную асимметрию.

Расчет показал, что для случая $n_B = 1 - n_A$ кривые ρ^* – состав всегда симметричны. Однако такое заполнение зон компонентов сплава нетипично для металлов и скорее свойственно соединениям типа металл – неметалл.

При произвольных числах заполнения ($n_A \neq n_B$) и ($n_A + n_B \neq 1$) кривые ρ^* – состав всегда асимметричны, а при промежуточном рассеянии на них появляются вогнутые участки (см. Рис. 2).

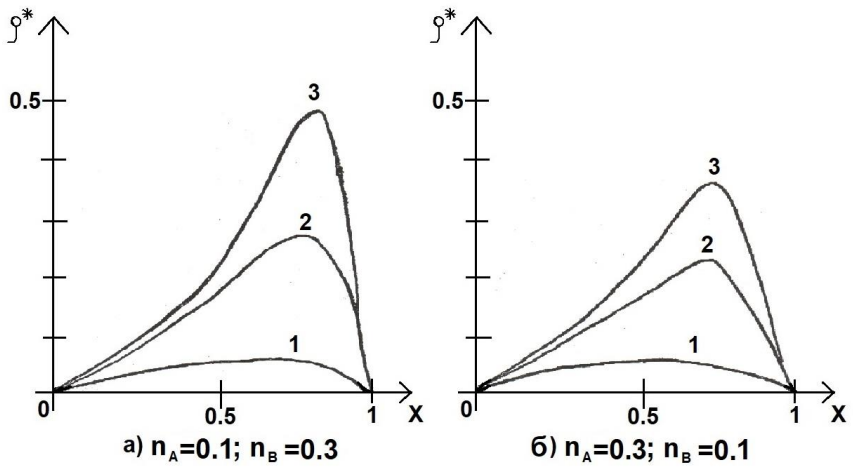


Рисунок 2 – Кривые ρ^* – состав при произвольных числах заполнения n_A и n_B (неизоэлектронные сплавы). 1 – $\delta = 0{,}25$; 2 – $\delta = 0{,}5$; 3 – $\delta = 0{,}6$.

Обсуждение результатов. Выводы

Как видно из этих рисунков, выполненные в рамках ПКП расчеты не позволяют однозначно классифицировать ДНТР по виду кривых ρ – состав, как это сделано в работах [5,6] (изоэлектронный сплав – выпуклая симметричная кривая, неизоэлектронный сплав – асимметричная кривая, имеющая вогнутые участки). Однако результаты проведенного расчета и выводы авторов работ [5,6] можно согласовать, сделав дополнительное предположение.

В рассматривавшейся модели параметр рассеяния δ и числа валентных электронов n_A и n_B считаются независимыми параметрами. В действительности параметр рассеяния δ определяется разностью «атомных» уровней ε_A и ε_B, которые зависят от зарядов ядер, степени их экранирования, особенностей электронной структуры металлов А и В. Поэтому разумно предположить, что в изоэлектронных сплавах, в которых металлы А и В обладают во многом аналогичной зонной структурой, а заряды ядерных остовов одинаковы, параметр рассеяния δ должен быть малым. Из наших же расчетов следует, что при малых δ кривые ρ – состав выпуклы при любых числах заполнения зон $n_A = n_B = n$, а асимметрия кривых настолько мала что её, видимо, можно «списать» на погрешность измерений. Для неизоэлектронных сплавов ($n_A \neq n_B$) отличия в электронной структуре и неравенство зарядов ядерных остовов компонентов должны приводить к существенно большим значениям параметра рассеяния δ. Это согласуется с нашими расчетами, из которых вытекает, что при $\delta \sim 1$ кривые ρ – состав обладают значительной асимметрией, и на них появляются вогнутые участки.

Это предположение подтверждается данными, полученными в работе [15]. В ней из рентгеновских спектров найдены значения параметра δ для некоторых

металлов. К сожалению, в этой работе непосредственно не найдены значения параметра рассеяния ни для одной из рассматривавшихся в [5,6] систем ДНТР. Однако результаты [15] позволяют оценить параметр $\delta = \frac{\varepsilon_A - \varepsilon_B}{w}$ для ряда интересующих нас систем ДНТР (здесь w – полуширина полосы металла, причем предполагается, что $w = w_A = w_B$). Авторы [15] определяли из рентгеновских спектров разность $\varepsilon_A - \varepsilon_B$ и брали из зонных расчетов w. Так ими было найдено

$$\delta_{Ti-Pd} = \frac{\varepsilon_{Ti} - \varepsilon_{Pd}}{w_{Ti}} = 2{,}00\,, \delta_{Ti-Ag} = \frac{\varepsilon_{Ti} - \varepsilon_{Ag}}{w_{Ti}} = 3{,}07.$$

Тогда, исключая центр тяжести полосы титана (назовем его металлом отсчета), получим

$$\delta_{Pd-Ag} = \delta_{Ti-Ag} - \delta_{Ti-Pd} = \frac{\varepsilon_{Ti} - \varepsilon_{Ag}}{w_{Ti}} - \frac{\varepsilon_{Ti} - \varepsilon_{Pd}}{w_{Ti}} = \frac{\varepsilon_{Pd} - \varepsilon_{Ag}}{w_{Ti}} = 3{,}07 - 2{,}00 = 1{,}07.$$

Аналогично можно оценить параметр рассеяния δ для следующих систем ДНТР (см. Таблица 1).

Как видно из таблицы, величина параметра рассеяния для конкретного сплава зависит от металла отсчета. Видимо, это несоответствие связано с предположением $w = w_A = w_B$. Тем не менее для всех рассмотренных неизоэлектронных сплавов (ДНТР – II) значения параметра рассеяния δ имеют порядок единицы. Для изоэлектронных сплавов (ДНТР – I) значения параметра рассеяния являются малыми (результат $\delta_{Au-Ag} = 0$ скорее всего связан с недостаточной точностью определения разности $\varepsilon_{Au} - \varepsilon_{Ag}$).

Таблица 1.

Тип ДНТР	Сплав	Параметр δ	Металл отсчета
ДНТР – I	*Pd-Pt*	0,36	Ti
		0,30	*V*
		0,25	*Cr*
		0,22	*Fe*
	Au-Ag	0,00	*Ti*
ДНТР – II	*Pd-Ag*	1,07	*Ti*
	Pd-Cu	1,14	*Ti*
	Pd-Au	1,07	*Ti*
		0,50	*V*

Таким образом сопоставление теоретических и экспериментальных кривых ρ – состав позволяет нам сделать вывод, что изоэлектронным сплавам присуще слабое рассеяние (ДНТР типа I), а для неизоэлектронных сплавов характерно «промежуточное» рассеяние (ДНТР типа II). Данный вывод подтверждается корреляцией между полученными из рентгеновских спектров значениями параметра рассеяния [15] и характером зависимости ρ – состав для ряда конкретных сплавов. Так для сплавов *Pd-Pt, Au-Ag* параметр рассеяния является малым и эта зависимость описывается выпуклой симметричной кривой (ДНТР типа I), а для сплавов *Pd-Ag, Pd-Cu, Pd-Au* параметр рассеяния имеет порядок единицы, и кривые ρ – состав для этих сплавов асимметричны, на них имеются вогнутые участки (ДНТР типа II).

Библиографический список

1. Смирнов А. А. Теория электросопротивления сплавов / А. А. Смирнов. – Киев : Изд-во АН УССР, 1960. – 150 с.
2. Soven P. Coherent – potential model of substitutional disordered alloys / P. Soven // Physical Review. – 1967. – Vol. 156, Iss. 3. – P. 809–813.
3. Волков В. А. Электросопротивление металлов с вакансиями / В. А. Волков // Физика металлов и металловедение. – 1980. – Т. 50, № 5. – С. 1094–1097.
4. Velicky B. Theory of electronic transport in disordered binary alloys: coherent potential approximation / B. Velicky // Physical Review. – 1969. – Vol. 184, Iss. 3. – P. 614–627.
5. Ведерников М. В. Закономерности поведения электросопротивления и термоэдс в системах двойных непрерывных твердых растворов металлов / М. В. Ведерников, В. Г. Двуниткин, А. Жумагулов // Физика твердого тела. – 1978. – Т. 20, № 11. – С. 3302–3305.
6. Жумагулов А. Об электрических и термоэлектрических свойствах двойных металлических сплавов / А. Жумагулов, М. В. Ведерников // Физика металлов и металловедение. – 1980. – Т. 49, № 4. – С. 892–894.
7. Velicky B. Single site approximations in the electronic theory of simple binary alloys / B. Velicky, S. Kirkpatrick, H. Ehrenreich // Physical Review. – 1968. – Vol. 175, Iss. 3. – P. 747–766.
8. Бородачев С. М. Остаточное сопротивление бинарных упорядочивающихся сплавов (приближение когерентного потенциала) / С. М. Бородачев, В. А. Волков, С. И. Машаров // Физика металлов и металловедение. – 1976. – Т. 42, № 6. – С. 1147–1153.
9. Волков В. А. Электросопротивление тройных упорядочивающихся ферромагнитных сплавов / В. А. Волков, А. А. Куранов, С. И. Машаров, П. Н. Сюткин // Физика металлов и металловедение. – 1979. – Т. 47, № 3. – С. 516–523.
10. Электросопротивление тройных упорядочивающихся сплавов замещения / В. А. Волков, Л. П. Зеленин, Н. А. Лобашева [и др.] // Физика металлов и металловедение. – 1989. – Т. 68, № 3. – С. 506–511.
11. Levin K. Transport in alloys: coherent potential approximation / K. Levin, B. Velicky,

H. Ehrenreich // Physical Review B. – 1970. – Vol. B2, Iss. 6. – P. 1771–1788.
12. Эренрейх Г. Электронная структура сплавов / Г. Эренрейх, Л. Шварц. – Москва : Мир, 1979. – 200 с.
13. Gellatt C. D. Charge transfer in alloys: Ag–Au / C. D. Gellatt, H. Ehrenreich // Physical Review B. – 1974. – Vol. B10, Iss. 2. – P. 398–415.
14. Chen A. B. Temperature dependence of the electron density of states and dc electrical resistivity of disordered binary alloys / A. B. Chen, G. Weisz, A. Sher // Physical Review B. – 1972. – Vol. B5, Iss. 8. – P. 2897–2924.
15. Kurmaev E. Z. The -parameter for the CPA – theory as determined from X-Ray spectra / E. Z. Kurmaev, V. P. Belash, A. Z. Menshikov // Solid State Communications. – 1975. – Vol. 17, Iss. 9. – P. 1059–1061.

УДК 551.72:56.012

Бородин Н.Д., Данилов Д.А., Киселева Д.В., Шиловский О.П

ЖИРОКИСЛОТНЫЙ СОСТАВ ФОССИЛИЙ ИЗ ПЕРМСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ МЕТОДОМ ГХ/МС

Аннотация. Статья посвящена исследованию жирокислотного состава ихнофоссилии (предположительно яйцо парарептилии) из Котельничского местонахождения парейазавров методом ГХ/МС. Был установлен жирокислотный профиль ихнофоссилии и проведено сравнение с жирокислотным составом яиц современных яйцекладущих животных.

Ключевые слова: ГХ/МС, ихнофоссилии, Котельничское местонахождение парейазавров, Жирокислотный состав.

Abstract. The article is devoted to the study of the fat-acid composition of ichnofossils (supposedly, parareptile eggs) from the Kotelnichsky location of pareiasaurs by GC/MS. The fatty acid composition of ichnofossils was established and compared with the fatty acid composition of eggs of modern oviparous animals.

Keywords: GC/MS, ichnofossil, Kotelnichsky location of pareiasaurs, Fatty acid composition.

Введение

Фоссилии представляют собой ископаемые остатки древних организмов, или следы их жизнедеятельности. Исследование фоссилий может предоставить много информации об организмах эпохи своего образования, указать на особенности строения, эволюционного развития организмов. При этом процессам фоссилизации подвергается ничтожная часть вымерших растений и животных. Как правило, их останки либо поедаются другими животными, либо разлагаются под воздействием грибков и бактерий.

Ихнофоссилии – представляют собой следы жизнедеятельности древних организмов, которые чаще всего сохраняются во вмещающих осадочных породах в виде биогенных структур, таких как следы/отпечатки лап, отпечатки беспозвоночных, зубные отметины, яйца и яичная скорлупа, окаменевшие фекалии (копролиты) и др. [Seilacher, 2007], являясь результатом непосредственного взаимодействия организмов и внешней среды. Чаще всего они сохраняются в виде отпечатков, реже в виде слабообъёмных образований.

Так как фоссилии могут нести в себе органические вещества [Dawid Surmik et al.,2016], то изучение дошедших до наших дней органических веществ в ископаемых образцах фоссилий может указать происхождение и эволюцию организмов.

Исследование ископаемых яиц позволяет получить больше информации о строении яиц древних яйцекладущих, пищевых предпочтениях этих животных. В

яйце жирные кислоты служат для создания клеточных мембран, обеспечения эмбриона энергией и развития его тканей. Изучение жирокислотного состава яйца может помочь установить его родственные связи с современными представителями яйцекладущих животных.

Котельничское местонахождение парейазавров – на данный момент одно из крупнейших в мире местонахождений первых парейазавров (Pareiasauridae). Вследствие уникальных тафономических условий, геохимических условий фоссилизации до наших дней доходит большое число хорошо сохранившихся скелетов, копролитов и других фоссилий. Кроме целых скелетов и их фрагментов, в терригенных отложениях северодвинского яруса на правом берегу реки Вятки неоднократно находились различные образцы ихнофоссилий. Природа образования этих фоссилий пока что до конца не ясна, что приводило исследователей к разнообразной идентификации собранного материала [Шиловский и др., 2020]. Определение жироксислотного состава методом ГХ/МС и конфигурации содержания липидов в образце фоссилии (предположительно яйца парарептилии) из котельничского местонахождения парейащавров позволит установить природу жирных кислот, принадлежащих образцу, а также определить его близость к современным животным. Что в свою очередь поможет отнести эту фоссилию к той, или иной группе ископаемых животных.

Образцы и методика эксперимента

– Оборудование

Анализ выполнялся при помощи газового хроматографа Perkin Elmer Clarus 600 с масс-спектрометром Perkin Elmer Clarus 600T (рис. 1), капиллярная колонка Elite-5MS 30 м×250 мкм, лайнер с внутренним диаметром 4 мм, в режиме бессбросового ввода образцов. Температура инжектора составляла 200°C с фазой испарения равной 1 мин. По программе температура термостата изменялась от 30 °C до 300 °C с последующим изотермическим периодом, составившим 10 мин. Масс-спектрометр работал в режиме ионизации электронным ударом (70 эВ). Диапазон регистрации масс-спектров по величине m/z составил от 35 до 400 Да. Идентификация пиков проведена с использованием встроенной библиотеки масс-спектров и литературных источников, а также собственной интерпретации масс-спектров.

Рисунок 1 – Газовый хроматограф Perkin Elmer Clarus 600 и масс-спектрометр Perkin Elmer Clarus 600T

– Пробоподготовка

Для выполнения анализа был взят образец ихнофоссилии (предположительно, фрагмент окаменевшего яйца парарептилии) найденный в отложениях северодвинского яруса местонахождений пермских тетрапод на р. Вятка под г. Котельнич (Котельничское местонахождение парейазавров, Ванюшонковская пачка, Кировская обл.) (рис. 2).

Перед анализом выделили пять точек (две точки в области вмещающей породы, одна точка на границе между включением фоссилии и вмещающей породы и ещё две в образце включения), в выбранных точках исследуемый образец был просверлен (диаметр отверстий 1,2 мм). Полученный при этом материал был взят для дальнейшего анализа.

Рисунок 2 – Исследуемый образец ихнофоссилии (1)

Для экстракции жирных кислот (ЖК) из навесок к ним прилили 1 см^3 смеси хлороформ-метанол (2:1). Растворитель отогнали в потоке азота, а к сухому остатку прилили 1 см^3 кислого метанола, для лучшего протекания реакции метилирования пробы поместили в ультразвуковую ванну на 20 мин. Образцы были центрифугированы в течение 10 минут при 3000 об/мин. Раствор был отделен, после чего растворитель отогнали в потоке азота. Полученный экстракт растворили в ацетонитриле. После чего экстракт был подвергнут дериватизации при помощи N,N-диметил-формамид диметил ацеталь (ДМФ-ДМА) для более полного метилирования ЖК.

Результаты и обсуждение

Переход от полностью водного образа потомками лопастепёрых рыб к наземному положил начало развитию надклассу четвероногих (Tetrapoda). В свою очередь в надклассе течетвероногих рассматривают два класса: амниот (рептиломорфов) и амфибий (земноводных). В классе амниот рассматривают две клады: завропсид (рептилий) и синапсид (включающих млекопитающих). На основании современных представлений о эволюционном развитии завропсид можно предположить, что ЖК-профиль ихнофоссилии должен быть ближе к ЖК-профилям яиц современных рептилий, чем к ЖК-профилям икры земноводных.

Метод ГХ/МС позволяет установить жирокислотный состав исследуемых объектов, однако при определении жирокислотного профиля невозможно установить к какому классу липидов относились найденные жирные кислоты. В данном исследовании рассматривались три возможных источника жирных кислот: триглицериды, фосфолипиды и свободные жирные кислоты. Триглицериды представляют собой большую часть липидов, входящих в состав желтков яиц современных животных, они служат для создания энергетического запаса эмбриона, а также входят в состав клеточной мембраны. Фосфолипиды – главный компонент клеточных мембран обеспечивают текучие и пластические свойства мембран клеток и клеточных органелл.

ГХ/МС анализ установил наличие шести насыщенных жирных кислот с линейной цепью. ЖК-профиль ихнофоссилии оказался близок к яйцам современных яйцекладущих животных. Аналогично яйцам современных яйцекладущих, преобладающей насыщенной жирной кислотой в ихнофоссилии является пальмитиновая. При этом холостые определения не имели значительного влияния.

Было установлено, что интенсивность пиков искомых жирных кислот, увеличивалась по мере приближения к включению ихнофоссилии (рис. 3), при этом ЖК-профиль значительно не изменяется (отношение пальмитиновой кислоты к стеариновой (P/S) составило 3.0). Из чего можно сделать вывод о том, что эти жирные кислоты относятся к исследуемому включению. Они могли попасть в породу при нарушении целостности яйца в процессе фоссилизации, а в дальнейшем диффундировать в породу на большую глубину, а разница в жирокислотном составе может быть вызвана различными условиями фоссилизации в породе и ихнофоссилии, а также небольшим количеством ЖК из окружающей среды (растения, почвенные организмы и т.д.).

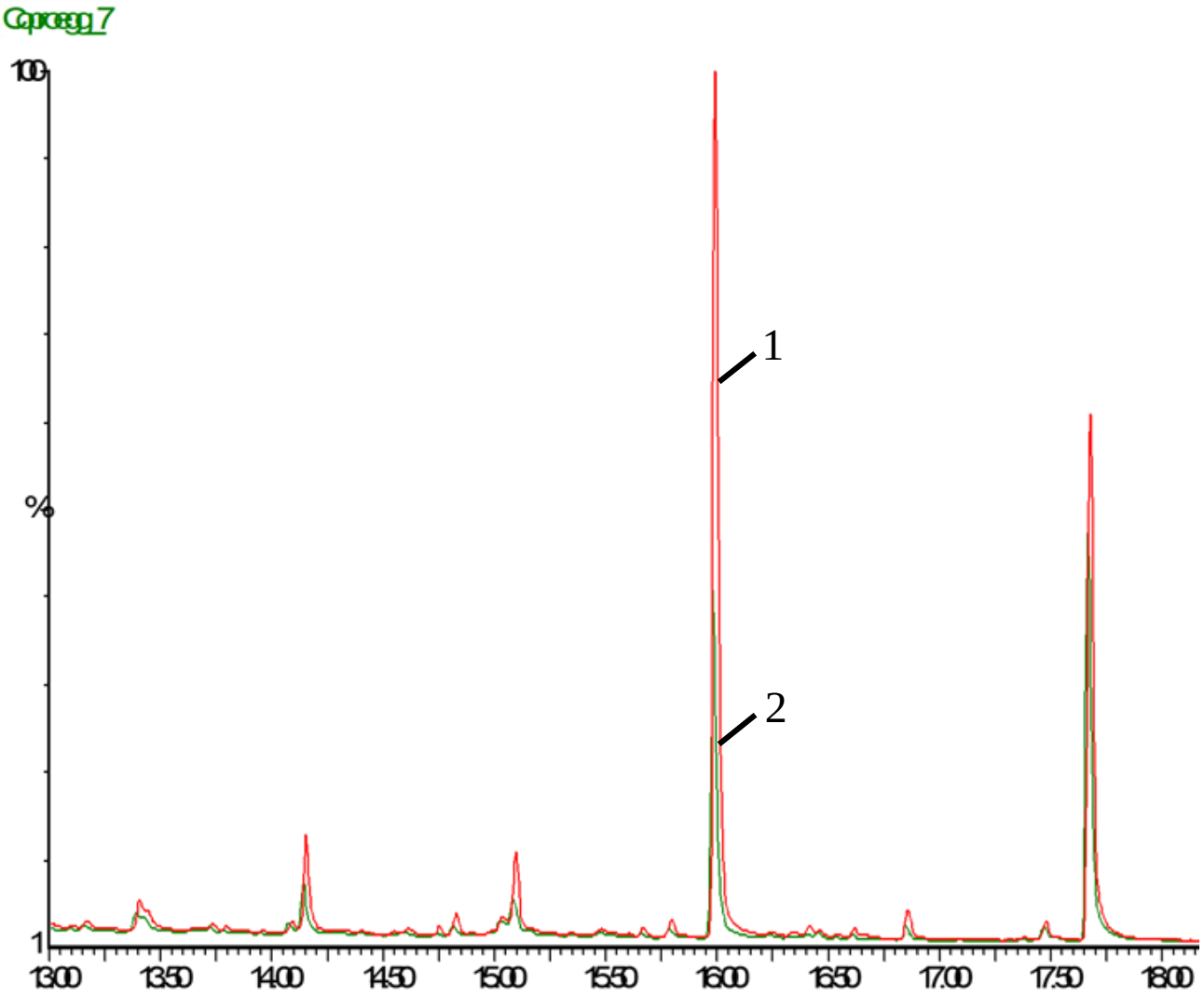


Рисунок 3. Пики пальмитиновой (С16) и стеариновой (С18) кислот в образце ихнофоссилии (1) и породе (2)

Таблица 1 – Жирокислотный состав ихнофоссилии, вмещающей породы и желтков яиц современных животных.

Образец	С14	С15	С16	С17	С18	С20	P/S
Ихнофоссилия	9.5	5.9	63.3	1.8	18.6	0.9	3.4
Порода	8.7	6.1	61.6	1.8	20.7	0.9	3.0
Курица Gallus gallus	-	-	23.51	-	7.7	-	3.05
Индейка Meleagris gallopavo	-	-	25.27	-	7.96	-	3.18

Продолжение таблицы 1

Аллигатор Alligator mississippiensis	-	-	26.53	-	5.90	-	4.5
Заборная игуана Sceloporus jarrovi	-	-	16.86	-	2.54	-	6.64
Восточный трехлинейный сцинк Bassiana duperreyi	1.75	-	18.24	-	5.66	-	3.22
Балканская черепаха Testudo hermanni	0.92	0.06	13.84	0.05	3.63	0.06	3.81
Нильский крокодил Crocodylus niloticus	3.84	1	28.28	0.98	8.62	0.2	3.28
Песочная жаба Bufo arenarum	1.49	-	28.94	-	14.96	-	1.94

Из таблицы видно, что исследуемый образец ихнофоссилии по жирокислотному составу близок к желткам яиц современных яйцекладущих рептилий. Менее всего образец схож с икрой жабы и яйцами птиц, что может являться ещё одним подтверждением гипотезы принадлежности данной ихнофоссилии к яйцам парарептилии.

Заключение

В результате проведения исследования образца ихнофоссилии установили наличие шести насыщенных жирные кислоты с линейной цепью. Обнаружили близость жирокислотного состава исследуемого образца к яйцам современных яйцекладущих животных.

Библиографический список

1. Шиловский О. П. Первая находка кладки ископаемых яиц пермских тетрапод Котельничского местонахождения, Кировская область / О. П. Шиловский, А. С. Бакаев, Д. В. Киселева // Металлогения древних и современных океанов. – 2020. – № 1. – С. 232–235.
2. Evaluation of different chemical compositions in eggs of the Hermann’s tortoise (Testudo hermanni) / M. Stvarnik, Z. Bajc, K. Sinigoj-Gacnik, A. Dovc // Slovenian Veterinary Research. – 2017. – Lit. 54, St. 1. – S. 11–20.
3. Noble R. C. Lipid and Fatty Acid Compositional Differences Between Eggs of Wild and Captive-Breeding Alligators (Gallus gallus, Meleagris gallopavo, Alligator mississippiensis, Sceloporus jarrovi): An Association with Reduced Hatchability? /

R. C. Noble, R. McCartney, M. W. J. Ferguson // Journal Zoology. – 1993. – Vol. 230. – P. 639–649.
4. Comparison of the Lipid Composition of Three Adipose Tissue Types of Male and Female Wild Nile Crocodiles (Crocodylus niloticus) / G. Osthoff, A. Hugo, D. Govender [et al.] // Journal of Herpetology. – 2014. – Vol. 48, Iss. 4. – P. 525–531.
5. Speake B. K. Lipid composition of eggs of an oviparous lizard (Bassiana duperreyi) / B. K. Speake, M. B. Thompson, R. J. McCartney // Lipids. – 1999. – Vol. 34, Iss. 11. – P. 1207–1210.
6. Buschiazzo J. Detailed Lipid Analysis of Yolk Platelets of Amphibian (Bufo arenarum) Oocytes / J. Buschiazzo, A. Bruzzone, T. S. Alonso. – DOI 10.1002/JEZ.A.10252 // Journal of Experimental Zoology. – 2003. – 1 June, Part A : Comparative experimental biology. – P. 37.
7. Spectroscopic studies on organic matter from Triassic reptile bones, Upper Silesia, Poland. / D. Surmik, A. Boczarowski, K. Balin [et al.] // PLoS ONE. – 2016. – Vol. 11. – P. e0151143.
8. Seilacher A. Trace Fossil Analysis / A. Seilacher. – Berlin : Springer, 2007. – XIII, 226 p. – ISBN 978-3-540-47225-4.

УДК 005.6

Бортникова К.С., Спиридонов Д.М.

ОБЗОР МЕТОДОВ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ НА ПРИМЕРЕ СМК

Аннотация. В статье описываются различные способы оценки результативности систем управления, существующих в организациях. Сделаны рекомендации по оценке результативности системы при внедрении новых (дополнительных) требований.

Ключевые слова: требования, развитие, система менеджмента качества, СМК, интегрированная система управления, результативность.

Annotation: The article describes different ways to assess the effectiveness of management systems that exist in organizations. Recommendations are made to assess the performance of the system when introducing new (additional) requirements.

Keywords: requirements, development, quality management system, QMS, integrated management system, performance.

В настоящее время существует множество различных подходов и способов оценки результативности системы управления. Российские специалисты в области менеджмента качества часто затрагивают вопросы оценки результативности. Например, Круглов М.Г.[1] акцентирует внимание на оценке существующей организационной структуры, пропагандируя практику современных IT-компаний и стандартов для системы управления организаций, разрабатывающих программное обеспечение. В тоже время Качалов В.А.[2], обращает внимание на конкретные показатели процессов, и рекомендуют способы наиболее понятные для организаций, работающих с международными клиентами.

Несмотря на наличие единых требований к системам управления (в данной работе взят пример с ГОСТ Р ИСО 9001-2015) каждая система сертификации предлагает свой вариант, а руководство проверяемой организации устанавливает свой вариант оценки результативности системы менеджмента качества (СМК). Для организаций, сертифицируемых на один стандарт, решить противоречия с проверяемой организацией достаточно легко, а для организаций междисциплинарной сферы, сертифицированной на несколько разных стандартов управления или только внедряющих их, – это практически не решаемая задача. Именно на основе разных взглядов и подходов, обусловленных различными системами, требованиями, проверяющими, возникает множество конфликтов и противоречий.

В связи с этим целью настоящей работы является определение и анализ методов результативности систем управления на примере СМК.

Единого подхода, учитывающего все аспекты деятельности организации, не существует. Согласно требованиям ГОСТ Р ИСО 9001 высшее руководство организаций самостоятельно определяет, как оценивать и повышать, результативность своей системы управления и как демонстрировать проверяющим – аудиторам или экспертной комиссии.

В открытых источниках можно встретить несколько методов оценки результативности систем управления. В данной работе представлены три метода, зависящих от способа установки показателей, по которым осуществляется оценка: по реализации установленных требований; на основании конкретных показателей; по степени достижения целей («по целям»).

Оценка результативности по реализации установленных требований

В данном случае система считается результативной, когда все требования (пункты) стандарта реализованы, как минимум документально подтверждены, и система работает стабильно. Такая оценка применима на этапе создания системы, когда необходимо внедрить (например, СМК). При этом для достаточно зрелой системы такой вариант является неэффективным, так как все требования и так уже реализованы и отлажены. И данная оценка показывает только часть общей картины. Показатели результативности в таком случае часто заменяются показателями, используемыми при мониторинге СМК.

Рассмотрим вариант реализации данного метода. На промышленных предприятиях Российской Федерации в основном применяют СМК в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9001, а если предприятие работает в мультиотраслевом секторе, то добавляются дополнительные требования. Например, для предприятия военно-промышленного комплекса применяют ГОСТ РВ 0015-002-2012, для медицины ГОСТ Р 52249-2009 (правила GMP), для нефти газовой отрасли ГОСТ Р ИСО 29001-2007 и т.д.

Рассмотрим предприятие нефтегазовой отрасли. Данное предприятие должно реализовать в рамках своей СМК все пункты стандартов ГОСТ Р ИСО 9001-2015 и ГОСТ Р ИСО 29001-2007. Так требования стандарта нефтегазовой промышленности на одну треть состоят из требований ГОСТ Р ИСО 9001, то выполнение всех требований стандарта предполагает их соответствие международному и национальному 9001.

Для оценки результативности на предприятии можно рассмотреть следующий метод: оценка результативности по реализации установленных требований реализуется через оценку соответствия требованиям стандарта, который планируется внедрить. Таким образом, организация должна подготовить отчет о самообследовании. На практике часто используется упрощенный вариант без оценки значимости критериев, но тогда оценка данным способом становится

более формальной и не в полной мере отражает реализацию всех требований, установленных конкретным стандартом.

Проверяется реализация каждого пункта и подпункта ГОСТ Р ИСО 29001. Стандарт состоит из 20 подпунктов, считая подразделы, начиная с четвертого по восьмой раздел, так как именно в этих разделах устанавливаются требования СМК. Выполнение каждого из подпунктов одинаково важно, следовательно, выполнение всех подпунктов свидетельствует о полном соответствии СМК установленному стандарту. Стоит также отметить, что требования ГОСТ Р 9001, входящий в нефтегазовый стандарт, приранивaются к отдельному подразделу/подпункту, поэтому они тоже имеют свой вес.

Расчет результативности СМК зависит от количества предъявляемых стандартами требований (в случае с ГОСТ Р ИСО 29001 это 20 подразделов и 53 подпунктов) с учетом общей весовой нагрузки.

По результатам анализа работы экспертов Росаккредитации, СДС «Русский Регистр», СДС «Военный Регистр» и других экспертов по международной сертификации было выявлено, что СМК считается результативной, если реализуется 91,5% требований стандарта, то есть если в сумме все несоответствия (по весовой оценке) не превышают невыполнение 2 подпунктов стандарта. Именно невыполнение 2 подпунктов стандарта считается критическим несоответствием во многих органах по сертификации [3].

Рассмотренный выше метод предназначен для организаций только внедряющих требования стандартов по управлению, так как он не отражает самой деятельности по процессам. Он удобен для проверки соответствия существующей системы установленным требованиям, позволяет найти наиболее проблемные места в организации для дальнейшего совершенствования и развития системы. После того как система уже внедрена и готова к сертификации, применение данного метода оценки результативности становится нецелесообразным.

Оценка результативности на основании конкретных показателей

Второй метод является достаточно удобным для оценки деятельности организации в целом, поскольку устанавливаются конкретные показатели, отражающие результаты основных процессов на предприятии. Без отлаженной и выстроенной системы невозможен выпуск качественной и конкурентоспособной продукции. Показатели результативности свидетельствуют о нормально выстроенной и стабильной системе управления, в частности СМК.

Данный метод предполагает расчет интегрального показателя результативности, механизм которого устанавливается самой организацией. В качестве примера рассмотрим «Методику оценки результативности СМК» разработанную при центральном органе СДС «Русский регистр». Отметим, что

организация вправе устанавливать интегральный показатель самостоятельно, в зависимости от специфики деятельности.

В рассматриваемом случае интегральный показатель состоит из нескольких показателей первого уровня. Значение интегрального показателя результативности СМК представляет собой количественную величину ($R_{\text{смк}}$), определяемую по формуле:

$$R_{\text{смк}} = \frac{\sum_{i=1}^{5} \beta_i \cdot R_i}{\sum_{i=1}^{5} \beta_i} \tag{1}$$

где R_i – значение i-го частного показателя первого уровня; β_i – коэффициент значимости i-го частного показателя первого уровня.

Пример расчета интегрального показателя по конкретным показателям процессов представлен на рисунке 1.

Пример расчета интегрального показателя по конкретным показателям процессов

$$R_1 = \frac{0{,}88 \cdot 1 + 0{,}9 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 1 \cdot 0{,}6}{1 + 1 + 1 + 1 + 0{,}6} = \frac{4{,}38}{4{,}6} = 0{,}9522$$

$$R_2 = \frac{0{,}99 \cdot 0{,}7 + 0{,}95 \cdot 0{,}7 + 0{,}97 \cdot 1 + 0{,}95 \cdot 1}{0{,}7 + 0{,}7 + 1 + 1} = \frac{3{,}278}{3{,}4} = 0{,}9641$$

$$R_3 = \frac{0{,}8 \cdot 1 + 0{,}75 \cdot 1 + 0{,}6 \cdot 1 + 0{,}8 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 0{,}9 \cdot 1 + 0{,}85 \cdot 1 + 0{,}9 \cdot 1 + 0{,}95 \cdot 1}{1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1} +$$

$$+ \frac{0.87 \cdot 1 + 0{,}9 \cdot 1 + 0{,}8 \cdot 1}{1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1} = \frac{10{,}12}{12} = 0{,}8433$$

$$R_4 = \frac{04 + 7}{5 + 8} = 0{,}8462$$

$$R_5 = \frac{0{,}875 \cdot 0{,}7 + 0{,}9 \cdot 1}{0{,}7 + 1} = \frac{1{,}5125}{1{,}7} = 0{,}8897$$

$$R_{\text{смк}} = \frac{0{,}9522 \cdot 1 + 0{,}964 \cdot 1 + 0{,}8433 \cdot 0{,}9 + 0{,}8462 \cdot 0{,}9 + 0{,}8897 \cdot 0{,}8}{1 + 1 + 0{,}9 + 0{,}9 + 0{,}8} = \frac{4{,}149}{4{,}6} = 0{,}902$$

Рисунок 1 – Пример расчет интегрального показателя ($R_{\text{смк}}$)

Если все показатели результативности первого уровня результативны, то интегральный показатель результативности находится на достаточно высоком уровне [4].

Далее $R_{\text{смк}}$ сравнивается с установленными критериями результативности. Критерии результативности устанавливаются самой организацией и зависят от ее сферы деятельности и степени контроля со стороны руководства процессами системы.

В данном случае степень результативности СМК считается высокой, если $R_{\text{смк}}$ больше 95%. При этом СМК работает стабильно. Оценка и улучшение процессов проводятся своевременно эффективно.

СМК признается достаточно результативной, если $R_{\text{смк}}$ от 85% до 95%. Это свидетельствует, что СМК работает вполне стабильно, не все требования стандартов реализованы должным образом. Оценка и улучшение процессов проводится не совсем своевременно и/или эффективно.

СМК признается нерезультативной при выполнении менее 84,9% требований стандарта. При этом необходимо провести дополнительный анализ причин невыполнения требований стандартов.

Весовые коэффициенты устанавливаются самой организацией чаще всего владельцами процессов, поэтому интегральный показатель носит достаточно субъективный характер. От точности оценки весовых коэффициентов зависит итоговый результат.

К плюсам данной методики можно отнести ее универсальность, так как она пригодна для различных организаций и отражает многие аспекты деятельности. К недостаткам можно отнести сложность в получении и обработке данных, так как расчет достаточно трудоемок, но дает довольно полную информацию о существующей системе управления.

Для анализа результативности системы управления часто бывает достаточно второго метода оценки результативности, но он не всегда может учитывать быстрое изменение внешней среды организации, в отличии от третьего метода.

Оценка результативности по степени достижения цели

Третий метод основан на оценке результативности по степени достижения целей («по целям»). Установка показателей по степени достижения целей является наиболее адаптивным и «мобильным» механизмом, так как позволяет работать и совершенствовать более акцентированно и глубоко «проблемные» участки системы.

Оценка результативности СМК проводится на основе анализа степени достижения установленных числовых значений показателей целей в области качества. Сущность данного подхода состоит в определении процессов СМК и соответствующих показателей, оценивании выделенных показателей с определенной периодичностью и получении комплексного показателя результативности СМК.

Например, на предприятиях машиностроения оценка результативности системы менеджмента качества проводится на основе анализа степени достижения установленных числовых значений показателей целей по таким сегментам как: «Удовлетворенность потребителей», «Качество технологических

процессов», «Функционирование СМК», «Кадровый потенциал». Расчет выполнения показателей целей осуществляется по формуле:

$$R_{\text{СМК}} = \frac{M_{\text{вып}}}{M_{\text{общ}}} \times 100\% \quad (2)$$

где $R_{\text{СМК}}$ – выполнение целей в области качества; $M_{\text{вып}}$ – количество выполненных целей/ показателей; $M_{\text{общ}}$ – суммарное количество целей/показателей.

Данный метод применяется для предприятий с уже внедренной, стабильной развитой и зрелой СМК. Он подразумевает оценку результативности по конкретным целям и задачам организации.

Таким образом, деятельность обеспечивающих и основных процессов отражается в ежегодных целях организации. При данном методе высшее руководство достаточно скрупулезно изучает все процессы организации и устанавливает только те цели, которые приведут к улучшению деятельности организации. Все остальные показатели оцениваются владельцами процессов в рамках мониторинга и периодического анализа текущей деятельности.

Оценка результативности в таком случае оценивается как степень достижения целей за исследуемый год. При этом цели могут реализовываться различными подразделениями, а общую оценку их достижений сводит служба качества и осуществляет руководитель организации или ответственный представитель руководства по СМК.

Плюсом такого метода является акцентирование внимания, как на всех процессах, так и на проблемных или требующих внимания местах, а также быстрая адаптация к изменяющимся внешним условиям. Ответственность за поддержание и текущий мониторинг деятельности при данном методе ложится на владельцев процессов и основных исполнителей.

Данный метод позволяет сократить ресурсы на анализ итоговой информации, но увеличивает ответственность руководства за установку правильных целей (показателей результативности). Такой подход наиболее применим для организаций с хорошо выстроенной и стабильной СМК. При этом могут освещаться только некоторые показатели, наиболее значимые в конкретный период времени. Поскольку цели организации в разные годы могут отличаться, а динамику общего развития системы необходимо отслеживать, то необходим особый контроль за СМК.

Это позволяет в кратчайшие сроки добиваться поставленных целей и СМК быть наиболее мобильной в условиях экономической нестабильности и сложной организационной структуры предприятия. Как уже отмечалось, к минусам данного метода можно отнести: сложность в оценке динамики процессов, повышенные риски, связанные с планированием деятельности организации.

После проведенного анализа трех основных методов оценки результативности систем управления была составлена таблица плюсов и минусов данных методов.

Таблица 1 – плюсы и минусы методов оценки результативности СМК

Название методов	Плюсы	Минусы
1. Оценка результативности по реализации установленных требований	– проверка реализации требования каждого пункта стандарта; – легко выявить несоответствия; – применим для самооценки организации перед сертификацией	– применима только при внедрении системы и подготовке к сертификации; – нецелесообразно применять к зрелой давно установившейся системе; – не отражает деятельности по процессам.
2. Оценка результативности на основании конкретных показателей	– - универсальность (данный метод можно применять на разных предприятиях); – отражает разные аспекты деятельности организации; – дает полную информацию о существующей системе управления.	– сложность в поучении и обработке данных; – трудоемкий процесс расчета; – не всегда возможно быстро учитывать изменение внешней среды организации.
3. Оценка результативности по степени достижения целей	– рассматривает все внутренние процессы на предприятии; – акцентирования внимание на проблемных процессах; – быстрая адаптация к внешним меняющимся условиям; – вовлеченность сотрудников, так как ответственность за процесс ложится на владельцев процесса и исполнителей.	– увеличение ответственности руководства за установку правильных целей (показателей результативности); – сложность оценки процессов в динамике – повышенные риски, связанные с планированием деятельности организации.

С помощью таблицы возможно определить какой из методов необходимо применить организации для оценки результативности. Для этого руководству организации и ведущим специалистам необходимо понимать на каком этапе развития находится предприятие.

Внедрение новых(дополнительных) требований

Применение вышеперечисленных вариантов оценки результативности СМК желательно соотносить с этапами ее внедрения и совершенствования. Предлагаем вариант использования оценки результативности системы при

внедрении новых (дополнительных) требований. Описанный метод применим только в случаях уже отлаженной СМК, которая учитывает установленные к ней требования. И несоответствия, в основном, касаются сути самих процессов, а не формальной реализации требований конкретных стандартов.

Комплексную процедуру можно разделить на два этапа.

1. Оценка реализации требований стандартов на уже внедренную систему, то есть проведение самообследования (установка показателей по конкретным видам деятельности).

2. Оценка показателей результативности системы по конкретным процессам и/или «по целям», то есть установка показателей, отражающих результаты процессов и конкретные цели организации.

Стоит также отметить, что варианты оценки результативности по конкретным видам деятельности и конкретным процессам активно используются международными аккредитованными агентствами, включая TÜV (SÜD, Thuringen), Bureau Veritas и тд., и являются основой для сертификации бизнес-процессов по CMMI, начиная со второго уровня зрелости. Подробнее с уровнями зрелости можно ознакомиться в соответствующей литературе [5].

В зависимости от целей оценки зависит глубина и детальность анализа.

Помимо различных методов оценки результативности следует отметить, что оценка результативности может иметь различную детализацию и глубину. Часто руководители организаций объединяют несколько методов, используют комплексную оценку.

При принятии решения о внедрении новых (дополнительных) требований или системы необходимо не только внедрить новые требования, но и удостоверится, что существующая система к этому готова, то есть результативна. Без подтверждения готовности деятельность по внедрению будет неэффективна, нерезультативна и принесет организации только убытки.

Входе анализа методов оценки результативности, примеров реализации данных методов и с учетом требований ГОСТ Р 53893-2010 «Руководящие принципы и требования к интегрированным системам менеджмента» были разработаны семь этапов внедрения дополнительных требований. Этапы представлены на рисунке 2.

Во-первых, необходимо оценить существующее положение дел (оценить результативность системы управления по первому методу), то есть провести самообследование. При признании системы результативной–продолжить работу, а при признании системы частично результативной (или нерезультативной) – устранить все выявленные несоответствия и повторно провести анализ.

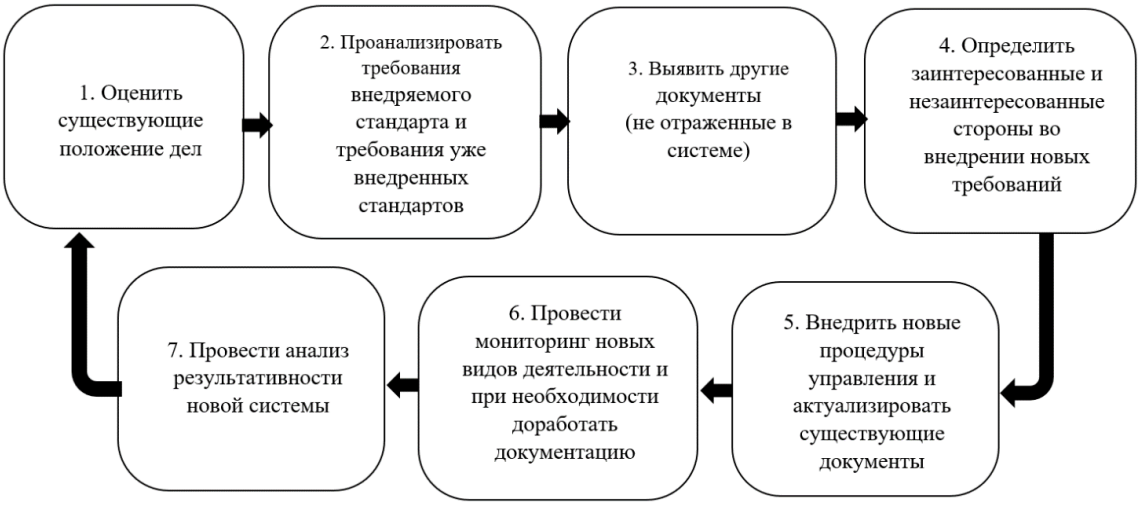


Рисунок 2 – Этапы внедрения новых требований

Во-вторых, проанализировать требования внедряемого стандарта и требования уже внедренных стандартов: провести аналогию в описании процессов, выявить дублирующие требования, при необходимости рассмотреть противоречащие друг другу требования и т.д.

В-третьих, выявить иные документы, не отраженные в существующей системе, которые могут описывать процедуры по новым требованиям.

В-четвертых, определить заинтересованные и незаинтересованные стороны во внедрении новых требований, начиная от конкретных исполнителей, заканчивая руководством.

Далее внедрить новые процедуры управления и актуализировать существующие документы по системе управления с новыми (дополнительными требованиям).

Затем провести мониторинг новых видов деятельности и при необходимости доработать документацию по пожеланиям потребителей данной документации.

В итоге необходимо провести анализ результативности новой системы на соответствие новым (внедренным) и старым (ранее существующим) требованиям. Соответствие новым требованиям для первого раза рекомендуется проводить по первому представленному методу, для анализа всей системы рекомендуется выбрать дополнительно второй и третий методы.

При разработке этапов по внедрению конкретных требований необходимо обязательно определять сроки и ответственных за внедрение, так как частое отсутствие временных и трудовых ресурсов ведет к будущим проблемам всей новой системы.

Стоит также обратить внимание на основные проблемы, возникающие при внедрении новых (дополнительных) требований в систему:

– при проведении анализа результативности на российских предприятиях не учитываются уровни развития процессов, причем даже для одной организации уровни развития процессов СМК могут отличаться;
– при анализе результативности действующей системы не всегда учитываются реальные проблемные ситуации в подразделениях;
– очень часто руководители среднего звена не видят или замалчивают проблемные вопросы для улучшения своих личных показателей;
– часто не проводится анализ внутренней производственной и психологической среды. Из анализа международной практики установлено, что немотивированный на качественную работу персонал создает дополнительные барьеры для внедрения новых управленческих решений;
– анализ и оценка существующей системы носит формальный характер и не соответствует реальному положению дел на предприятии;
– распределение ресурсов не соответствует поставленным перед организацией целям.

Заключение

По результатам исследования нескольких систем управления, учета международного и российского опыта, анализа и оценки результативности различных систем управлений предложены и проиллюстрированы три метода оценки результативности.

– Оценка результативность по степени реализации установленных требований.
– Оценка результативности на основании конкретных показателей.
– Оценка результативности по степени достижения целей («по целям»).

Применение каждого из методов зависит от деятельности предприятия, целей анализа результативности и основных задач руководства.

Первый метод рекомендован к применению преимущественно для только внедряющихся систем. Также метод применим для комплексной оценки, в том числе для проведения самообследования организации перед сертификацией.

Второй метод применим для организаций с уже развитой системой управления. Он основывается на детальном анализе результатов процессов и рекомендован для организаций с прозрачной и установившейся системой производства.

Третий метод является наиболее быстрым и развивающим организацию, но он требует хорошей подготовки руководителей в части стратегического

менеджмента и планирования. Данный метод также рекомендован для инновационных, высокотехнологичных, научных предприятий.

После достаточно подробного разбора наиболее распространенных способов оценки результативности деятельности организации можно сделать вывод, что данный вопрос является достаточно сложным и его решение подчас бывает не столь элементарным. Причем в данной статье была рассмотрена именно оценка результативности деятельности системы без привязки к экономическому эффекту от ее внедрения и применения (эффективности), что не совсем корректно для стратегического менеджмента организации.

Итак, в данной работе представлены три аспекта, упрощающие внедрение и развитие любой системы в организации.

Описаны также наиболее распространенные универсальные методы оценки результативности. Предложена двухэтапная модель оценки результативности любой системы при внедрении и реализации новых (дополнительных) требований к системе. Разработаны семь этапов внедрения новых (дополнительных) требований к системам управления, на основе которых возможно внедрение любых требований.

Библиографический список

1. Круглов М. Г. Менеджмент технологической готовности при создании технических систем и инновационной наукоемкой продукции / М. Г. Круглов // Менеджмент качества. – 2015. – № 3. – С. 31–42.
2. Качалов В. А. О предназначении внутренних аудиторов системы менеджмента качества / В. А. Качалов // Методы менеджмента качества. – 2013. – № 1. – С. 30–39.
3. Животкевич И. Н. Оценка и мониторинг результативности и эффективности системы менеджмента качества оборонного предприятия / И. Н. Животкевич // Вестник качества. – 2008. – № 8 – С. 113–125.
4. Методика оценки результативности системы менеджмента качества / Система добровол. сертификации «Военный Регистр». – 2-я ред. – Москва : СДС «Военный Регистр», 2012. – 47 с.
5. Chrissis M. B. CMMI for Development: Guidelines for Process Integration and Product Improvement / M. B. Chrissis, M. Konrad, S. Shrum // Addison-Wesley Professional. – 2011. – Part of the SEI Series in Software Engineering series. – P. 688–702.
6. ГОСТ Р 53893–2010. Руководящие принципы и требования к интегрированным системам менеджмента : дата введ. 2011–01–01. – Москва : Стандартинформ, 2011. – URL: http://docs.cntd.ru/document/1200081847 (дата обращения: 15.03.2021).
7. ГОСТ Р ИСО 9001–2015. Системы менеджмента качества. Требования : дата введ. 2015–11–01. – Москва : Стандартинформ, 2015. – URL: http://docs.cntd.ru/document/1200124394 (дата обращения: 18.03.2021).

УДК 620.179.1

Черных С. Е., Костин В. Н., Комоликов Ю. И.

ТЕПЛОВОЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ПОРИСТЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Методом теплового контроля были исследованы цилиндрические пористые диафрагмы из композита на основе оксидов циркония и алюминия. Применение методики активного двустороннего теплового контроля позволило получить результаты, показывающие возможность обнаружения производственных дефектов типа свищей и трещин, а также других поверхностных неоднородностей.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, дефектоскопия, тепловой контроль, инфракрасная термография, температурное поле, дефект, композит, композиционные материалы, керамические пористые диафрагмы.

Abstract. Cylindrical porous diaphragms made of a composite based on zirconium and aluminum oxides were studied by the method of thermal control. The use of the active two-way control technique allowed detecting manufacturing defects such as fistulas and cracks, as well as other surface inhomogeneities.

Keywords: non-destructive testing, flaw detection, thermal testing, infrared thermography, temperature field, defect, composite, composite materials, ceramic porous diaphragms.

Введение

Пористые композитные материалы (ПКМ) широко используются при изготовлении мембран, фильтров и других разделительных перегородок в различных отраслях промышленности. Наиболее предпочтительной формой перегородок считается цилиндрическая, трубчатые фильтрующие системы используются повсеместно. При реализации некоторых электрохимических процессов используют трубчатые диафрагменные реакторы [1]. Диафрагмой в реакторах называют пористую перегородку, предназначенную для разделения продуктов электролиза, образующихся на электродах реактора. Диафрагма – одна из важнейших деталей электрохимического реактора, которая существенно влияет на энергетику процессов электролиза, а также на срок эксплуатации [2]. В большинстве электрохимических реакторов, работающих в экстремальных условиях, используют керамические микропористые диафрагмы. Также и в фильтрующих системах предпочтительно применять композитные керамические материалы. Керамические мембраны обладают рядом преимуществ, позволяющих использовать их в специфических технологических условиях, основные из которых: повышенная механическая прочность и жесткость структуры, коррозионная и термическая стойкость, стабильность рабочих характеристик при длительном использовании, возможность многократной

регенерации [3]. При использовании в фильтровальном процессе исключительным достоинством композитных керамических материалов являются возможность разделения смесей и растворов при высоких температурах. При проведении процесса в условиях высоких температур снижается вязкость разделяемой системы, и в результате увеличивается производительность. Снимается ряд проблем, возникающих при очистке и регенерации мембран. Мембраны можно промывать горячими растворителями, обрабатывать концентрированными кислотами, щелочами и др. Отработанные керамические мембраны можно регенерировать выжиганием органического осадка, проникшего в их поры. Керамические мембраны можно применять в широком диапазоне изменения pH среды. Керамические мембраны сохраняют свои свойства при нагреве до 1000 °C, способны работать под большим давлением (1–10 МПа), могут периодически подвергаться стерилизации паром при температуре 120 °C (для получения стабильно стерильного ультрафильтрата) или прокаливаться для удаления загрязнений при температуре 500 °C [3].

Основной способ получения композитных керамических мембран, фильтров (отличие в размере пор) и диафрагм для электрохимических реакторов – это формование дисперсных порошков (как правило, оксидов) с добавками гидроксидов, карбонатов, силикатов и их спекания с формированием пористой структуры. Регулируя дисперсность порошков, количество и вид добавок, контролируя способ термической обработки смеси, получают керамическое изделие с различной пористостью и проницаемостью.

В настоящее время наиболее полно разработаны методы получения керамических мембран на основе дисперсного оксида алюминия с добавками оксидов других металлов. Такие мембраны отличаются механической прочностью и термостойкостью. Они пригодны для получения композиционных мембран с использованием металлических элементов, так как их коэффициенты линейного расширения близки.

Керамические мембраны на основе порошков оксида алюминия имеют пористую структуру с размерами пор сравнительно большого диаметра (порядка 100 нм – 10 мкм) и пригодны для микрофильтрации [4]. Как правило, промышленные керамические фильтры имеют трубчатую форму.

Использование стандартных методов порошковой металлургии путем подбора керамического наполнителя соответствующего гранулометрического состава с последующим его спеканием позволяет получать пористые керамические диафрагмы для электрохимических реакторов с необходимой совокупностью свойств.

Основными требованиями, предъявляемыми к диафрагмам для электрохимических реакторов, являются максимальные прочность и пористость.

Требования к прочности возникают вследствие того, что диафрагма в электрохимическом реакторе может работать под нагрузкой и должна выдерживать перепад давления до 1,0 МПа.

Изделия из ПКМ относятся к общей группе функциональной керамики и им присущи специфические дефекты этой группы (трещины, свищи, сколы, разнотолщинность), образующиеся как при получении, так и при эксплуатации. Визуально они незаметны на поверхности изделия из ПКМ, однако их наличие приводит к серьезному ослаблению конструкции и впоследствии может стать причиной катастрофы. Важным качеством мембран для микро- и ультрафильтрации является узкое распределение пор по размерам (селективность). Обнаружение крупных неселективных пор, отверстий и трещин является одной из приоритетных задач в дефектоскопии диафрагм.

На данный момент исследование открытой пористости ПКМ возможно многими методами так, например: световой микроскопии, капиллярными, термопорометрии, жидкостной и газовой волюмометрии, заполнения пор жидкостью, гидростатического взаимодействия жидкостей, ртутной порометрии. А основными способами дефектоскопии являются: методы световой микроскопии, воздействие жидкостной или газовой среды под давлением.

Как показывает практика, традиционные методы контроля являются сложными и трудоемкими, в какой-то мере разрушающими, и, зачастую не дают полной картины дефектного состояния изделий из ПКМ, а также являются затратными.

В данной работе цилиндрические пористые диафрагмы из композита на основе оксидов циркония и алюминия исследованы методом теплового неразрушающего контроля [5]. Указанные изделия служат для разделения анодного и катодного пространства в проточных электрохимических реакторах, работают при избыточном давлении, потому любой дефект приводит к их разрушению и выходу из строя оборудования.

Образцы и методика эксперимента

Целью эксперимента было исследование дефектов в керамических трубках малого диаметра в инфракрасном диапазоне методом активного теплового неразрушающего контроля, при котором объект контроля подвергается воздействию внешнего источника тепловой энергии. Дефекты имели как искусственное, так и естественное происхождение (образовались в результате несоблюдения технологии производства указанных изделий).

Для испытаний были представлены четыре образца с дефектами из корундо-циркониевой керамики, полученной спеканием. Образцы формовали литьем

шликера в гипсовые формы. Затем сушили и спекали в муфельной печи в атмосфере воздуха при 1050-1250 °С.

Образцы имели состав (весовой, %): Al_2O_3 – 60%, ZrO_2 – 37%, Y_2O_3 – 3%.

Физические характеристики композита: плотность, ρ = 2,8 г/см^3, сопротивление изгибу, $\sigma_{изг}$ = 40 МПа, пористость 40-50%, размер пор 0,1 – 5 мкм.

Размеры образцов и характеристики дефектов:

образец №1 – ∅28х2,0х115 мм с дефектом (естественным) в виде продольной сквозной трещины по всей длине образца;

образец №2 – ∅29х1х164 мм с дефектом (естественным) в виде сквозного отверстия диаметром 0,3 мм на расстоянии 15 мм от торца трубки;

образец №3 – ∅28х2,5х215 мм с дефектом (искусственным) в виде паза (пропила) шириной 3 мм, длиной 30 мм, глубиной 1,5мм на внутренней стороне трубки.

образец №4 – ∅28х2,5х290 мм с дефектом (естественным) в виде паза (царапины) шириной 1 мм, длиной 30 мм, глубиной 1,5 мм на внутренней стороне трубки.

Процесс исследования был разбит на три этапа. На первом этапе исследовалась сама возможность информативного наблюдения исследуемых образцов из указанного материала заданной формы в инфракрасном диапазоне, а также был оценен коэффициент излучения материала представленных образцов. На втором и третьем этапе исследований для обнаружения дефектов был применен активный тепловой контроль – односторонний и двусторонний соответственно.

На первом этапе исследований необходимо было узнать, как ведет себя композитная керамика при воздействии на нее источника тепловой стимуляции для дальнейшего планирования и постановки экспериментов по тепловому контролю образцов из подобных типов керамики. На данный момент времени отсутствуют данные относительно поведения представленного для изучения типа композитной керамики в тепловом диапазоне излучения электромагнитных волн. Также целью этого этапа эксперимента было исследование излучательной способности керамических трубок малого диаметра в инфракрасном диапазоне (7-14 мкм).

В состав экспериментальной установки входил Тепловизор NEC TH7800 с разрешением матрицы 320х240 элементов. В качестве источника тепловой стимуляции применялся прожектор с галогенной лампой [6] с защитным стеклом мощностью 1 кВт на штативе.

В ходе первого этапа эксперимента произведено термографирование общего вида образцов при следующих условиях: до нагрева, под различными углами относительно поверхности расположения образцов; на начальной стадии нагрева;

в завершающей стадии нагрева; сразу после отключения источника тепловой стимуляции.

Также проведена инфракрасная съемка самого источника тепловой стимуляции, температура поверхности которого составила 155 °С. Время прогрева источника стимуляции – 2 минуты. Время теплового воздействия на образцы – 3 минуты. Температура в помещении – 24 °С. Расстояние от источника до образцов – 500 мм. Обработка и анализ полученных в ходе эксперимента термограмм проводились в программном пакете GORATEC Thermography Studio (version 5.1.0.921).

На втором этапе работы для поиска дефектов был исследован односторонний метод теплового неразрушающего контроля [6], при котором источник нагрева объекта контроля и средство регистрации теплового излучения расположены по одну сторону объекта контроля. В эксперименте был использован Тепловизор FLIR T620bx с разрешением 640x480 элементов. Источник тепловой стимуляции остался прежний, как и на первом этапе исследований.

В ходе эксперимента произведено термографирование участков образцов с дефектами при следующих условиях – до и во время нагрева образцов и при различных углах, как направления съемки, так и расположения нагревателя.

Температура поверхности источника тепловой стимуляции составила 160 °С. Время прогрева источника стимуляции – 3 минуты. Время теплового воздействия на образцы в каждом эксперименте – 3 минуты. Температура в помещении – 23 °С. Расстояние от источника до образцов – 400 мм.

На третьем этапе исследований был применен двусторонний метод теплового неразрушающего контроля [7], при котором источник нагрева объекта контроля и средство регистрации теплового излучения расположены с противоположных сторон объекта контроля. В качестве источника тепловой стимуляции, вводимого внутрь исследуемых образцов, использовался спиральный нагревательный элемент, температура поверхности которого находилась в диапазоне от 230 °С до 340 °С. Нагреватель представлял собой навитую на огнеупорный цилиндр металлическую спираль, по которой пропускался ток, регулируемый реостатом. Время теплового воздействия на образцы в каждом эксперименте составляло до 3 минут. Распределение тепловых полей на наружной поверхности образцов фиксировалось также с помощью инфракрасной камеры FLIR T620bx при дистанции наблюдения 300 мм. Обработка и анализ полученных в ходе эксперимента термограмм проводились в программном пакете Flir QuickReport 1.2 SP2 (версия 1.0.1.217).

Результаты и обсуждение

По анализу термограмм, полученных на первом этапе можно сделать вывод о том, что близкое нахождение оператора с тепловизионной камерой не приводит к появлению на поверхности образцов бликов от отраженного излучения. Но при этом на образцах, подвергающихся воздействию источника нагрева, появился блик – прямое отражение источника нагрева в направлении оператора. Повышение видимой температуры в этих участках составило около 3 °С, по сравнению с остальной поверхностью образцов. Таким образом, на данном материале блики от высоконагретых источников инфракрасного излучения легко идентифицируются и могут фильтроваться на фоне других возможным тепловых аномалий.

После снятия тепловой нагрузки по анализу термограмм обнаружено, что температура образцов довольно быстро вернулась в исходное состояние. Что говорит о быстром остывании на воздухе тонкостенных образцов, хорошо отдающих свое тепло окружающему пространству с двух сторон – внутренней и внешней.

Оцененный по анализу отраженного излучения от источника нагрева коэффициент излучения материала ε составил около 0,97. Полученное значение коэффициента излучения в подобных условиях является приближенным и оценочным. Но, в тоже время, этого достаточно, чтобы сделать вывод о пригодности подобных материалов (пористой керамики малого диаметра) для теплового контроля [5].

Также на основании анализа полученных термограмм был сделан вывод о недостаточном разрешении применяемого тепловизора. Поэтому в дальнейших экспериментах была использована инфракрасная камера с разрешением 640x480 элементов.

Анализируя термограммы, полученные на втором этапе исследований можно сделать вывод, что без воздействия дополнительного источника стимуляции зоны дефектов не выделяются на термоизображениях. Разница температур между поверхностью фона и образцами составила около 1°С, что позволяет уверенно определять лишь контуры образцов.

При включенном же источнике тепловой стимуляции и при различном времени нагрева зоны дефектов под разными углами съемки также не определяются на термограммах.

И, только на термограмме фрагмента образца №4 было обнаружено, что изменение геометрии поверхности трубки в месте выбоины (поры) приводит к увеличению видимой температуры в этой области (на 5 °С относительно фона). Это возможно как за счет изменения условий отражения (фактически – изменению коэффициента излучения) в этой зоне, так и за счет локального уменьшения толщины стенки на этом участке.

В процессе третьего этапа эксперимента были получены следующие термоизображения участков образцов с дефектами:

– выбоина (пора) размером 0,7х1,4 мм глубиной 1 мм на образце №4 (рис. 1) – обнаружение первоначально не входило в цели эксперимента;

– продольный наплыв материала, а также выбоины («вмятины») размером 1 мм глубиной 0,2 мм на образце №4 – обнаружение первоначально не входило в цели эксперимента;

– фрагмент образца №4 с естественным дефектом в виде паза (царапины) шириной 1 мм, длиной 30 мм, глубиной 1,5 мм на внутренней стороне трубки – дефект не обнаружен;

– образец №1 с естественным дефектом в виде продольной сквозной трещины по всей длине образца (рис. 2), источник нагрева присутствует и имеет контакт с образцом в нижней части, начальная стадия нагрева;

– образец №1 с естественным дефектом в виде продольной сквозной трещины по всей длине образца, источник нагрева присутствует и не имеет контакта с образцом, завершающая стадия нагрева;

– образец №1 с естественным дефектом в виде продольной сквозной трещины по всей длине образца, источник нагрева убран из образца – естественное охлаждение;

– фрагмент образца №2 с естественным дефектом в виде сквозного отверстия диаметром 0,3 мм на расстоянии 15 мм от торца трубки (рис. 3);

– фрагмент образца №3 с искусственным дефектом в виде паза (пропила) шириной 3 мм, длиной 30 мм, глубиной 1,5 мм на внутренней стороне трубки – дефект не обнаружен;

Также в процессе эксперимента фиксировалась температура источника тепловой стимуляции.

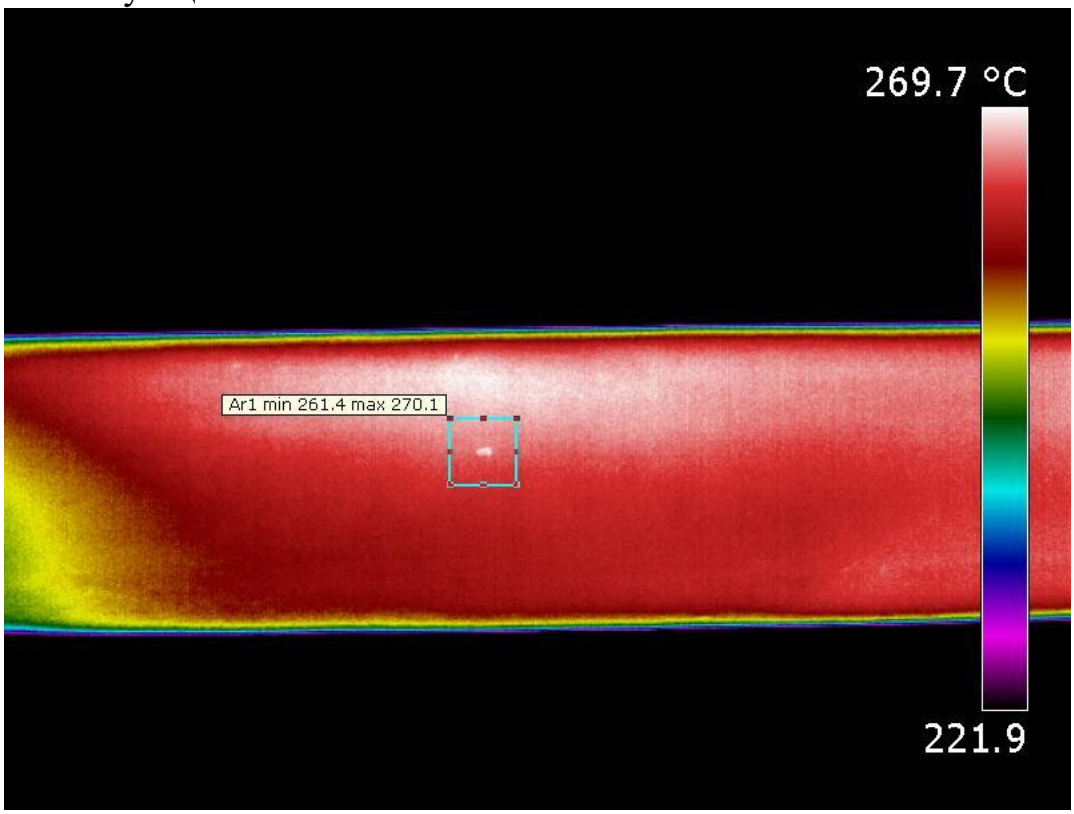


Рисунок 1 – Термограмма исследуемого образца №4, глубокая выбоина

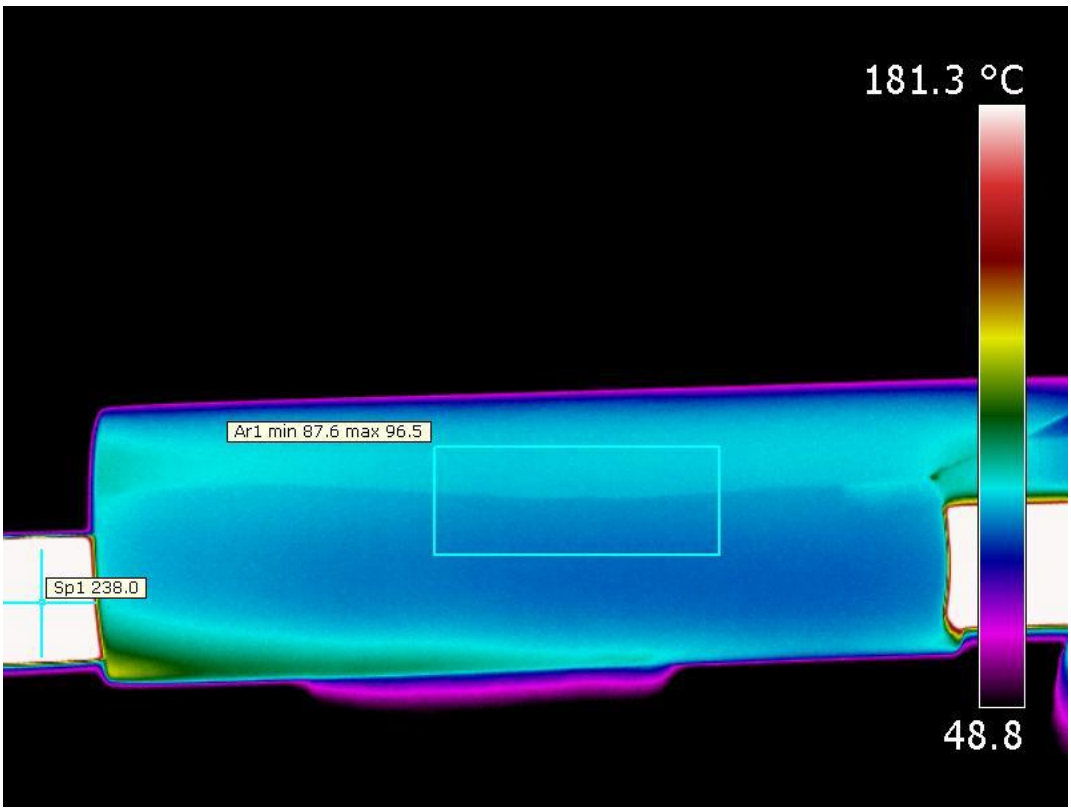


Рисунок 2 – Термограмма образца №1 с продольной сквозной трещиной на начальной стадии нагрева

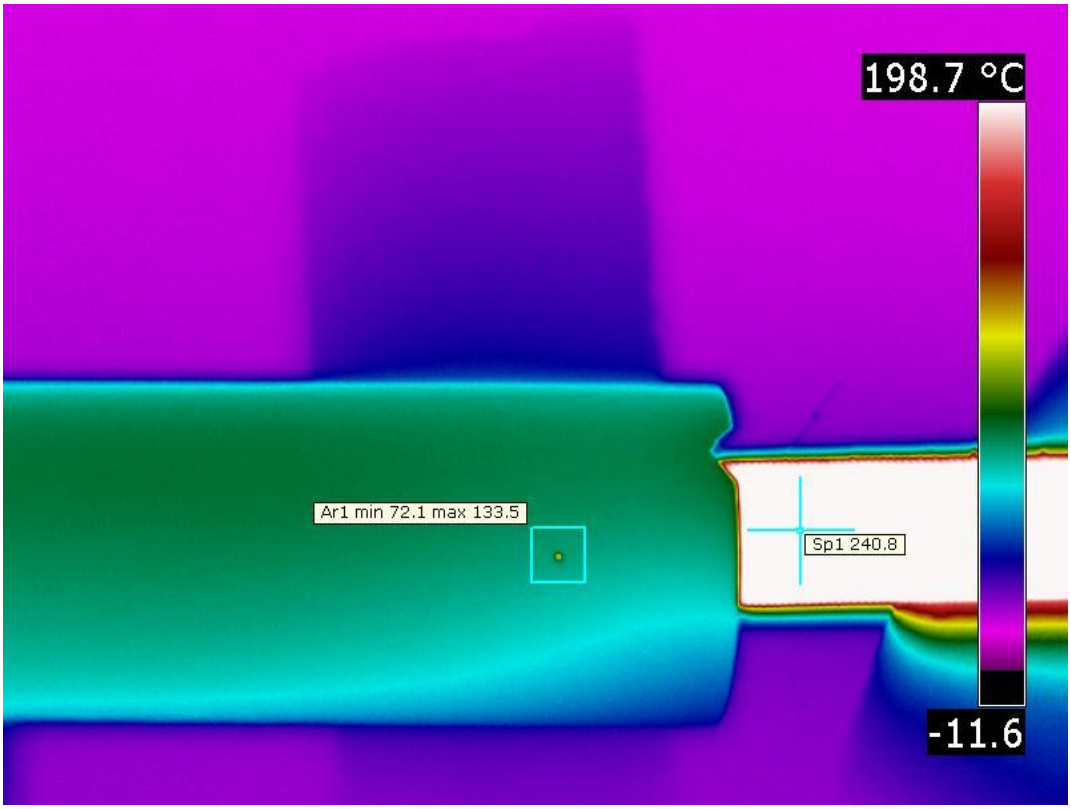


Рисунок 3 – Термограмма исследуемого образца №2, сквозная пора 0,3 мм

Анализируя термограммы образцов №3 и №4 можно сделать вывод о том, при двустороннем тепловом контроле подобных изделий из данного материала естественные и искусственные дефекты типа утонения стенки до 50% на внутренней поверхности трубки не могут быть обнаружены. В частности, при данном эксперименте не видны на термограммах: естественный дефект в виде паза (царапины) шириной 1 мм, длиной 30 мм, глубиной 1,5 мм на внутренней стороне трубки, а также искусственный дефект в виде паза (пропила) шириной 3 мм, длиной 30 мм, глубиной 1,5 мм на внутренней стороне трубки.

Можно предположить, что подобный вид дефектов может быть обнаружен с помощью других схем теплового контроля [8] при использовании, например, конвекционного источника нагрева [6], а также циклических способов тепловой стимуляции [9].

Согласно термограммам, представленным на рис. 1, обнаружены поверхностные неоднородности изделия, определение которых первоначально не входило в цели эксперимента. К ним относятся выбоина (размер 0,7x1,4 мм, глубина 1 мм), имеющая повышенную температуру (рис. 1) относительно фона на 9 °С, вероятнее всего из-за повышения коэффициента излучения в ее полости (аналог АЧТ) и уменьшенной теплоотдачи. А также неглубокие «вмятины» размером 1 мм, глубиной до 0,2 мм и наплыв материала (образец №4), понижение температуры относительно фона составило до 12 °С, что вызвано, вероятнее всего как уменьшением коэффициента излучения, так и дополнительным охлаждением на воздухе в указанных областях.

По анализу термограмм на рис. 2 можно сделать вывод, что при определенных условиях возможно обнаружение сквозной продольной трещины. Наилучший тепловой контраст 8 °С был достигнут на начальной стадии нагрева в случае контакта нагревателя с нижней частью образца (рис. 2), когда материал по разные стороны от берегов трещины имеет разную температуру, а тепловая волна не может перейти через воздушный зазор трещины. На конечной стадии нагрева при отсутствии контакта нагревателя и образца, а также при последующем охлаждении образца на воздухе трещина также выявляется, так как в этом случае она продолжает являться препятствием для равномерного перераспределения тепла при нагреве/остывании образца. При этом также играет роль невысокая теплопроводность самого материала образца.

По анализу термограммы на рис. 3, полученной при контроле образца со сквозной порой 0,3 мм можно сделать вывод, что в этом случае возможно уверенное выявление дефекта типа сквозное отверстие. При этом температурный перепад между дефектом и фоном составил порядка 60 °С, что является даже избыточным для фиксации с помощью современных тепловизионных средств диагностики. Тот факт, что максимальная температура области отверстия 133,5 °С

значительно меньше температуры внутреннего нагревателя 240 °С, может говорить о том, что в данном случае, скорее всего, нет прямого просвечивания излучения через отверстие, а имеет место ряд отражений от его внутренних стенок. А также, в силу небольшого размера отверстия и относительного удаления камеры от образца изображение отверстия проецируется только на часть чувствительного элемента матрицы тепловизора. Подробное объяснение данного случая требует дальнейшего изучения с постановкой ряда экспериментов.

Обобщенные результаты выявляемости дефектов на исследованных образцах различными способами теплового контроля представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Выявляемость дефектов

Дефект	Односторонний тепловой контроль	Двусторонний тепловой контроль
Продольная сквозная трещина	не обнаружена	обнаружена ΔT* = 8 °С
Отверстие (свищ) 0,3мм	не обнаружено	обнаружено ΔT = 60 °С
Паз на внутренней стороне	не обнаружен	не обнаружен
Поверхностная неоднородность – пора (выбоина)	обнаружена ΔT = 7 °С	обнаружена ΔT = 9 °С
Поверхностная неоднородность – наплыв	не обнаружена	обнаружена ΔT = 12 °С
*температурный перепад между зоной дефекта и фоном		

Заключение

Изучена возможность теплового контроля пористых корундо-циркониевых керамических трубчатых образцов, оценены их характеристики относительно воздействия внешних источников тепловой стимуляции. Установлено, что односторонняя схема активного теплового контроля с прожектором в качестве источника тепловой стимуляции практически неприменима для контроля исследуемых изделий.

Применение методики активного двустороннего теплового неразрушающего контроля позволило получить результаты, показывающие возможность обнаружения производственных дефектов типа свищей и трещин, а также других поверхностных неоднородностей.

Представленные на термограммах дефекты отчетливо выявляются, метод получения термоизображений изделий достаточно технологичен. Таким образом,

рассматриваемый подход позволяет проводить дефектоскопию в потоке при производстве цилиндрических пористых диафрагм из композитных материалов.

По результатам наших исследований метод теплового неразрушающего контроля можно рассматривать как один из наиболее перспективных для дефектоскопии изделий из ПКМ.

Библиографический список

1. Гинберг А. М. Технология важнейших отраслей промышленности / А. М. Гинберг, Б. А. Хохлов, П. Дрякина [и др.] ; под ред. А. М. Гинберга, Б. А. Хохлова. – Москва : Высшая школа, 1985. – 496 с.
2. Справочник по электрохимии / под ред. А. М. Сухотина. – Ленинград : Химия, 1981. – 488 с.
3. Свойства микропористой композиционной керамики на основе оксидов циркония и алюминия / Ю. И. Комоликов, И. Д. Кащеев, К. Г. Земляной [и др.] // Новые огнеупоры. – 2020. – № 3. – С. 30–33.
4. Komolikov Yu. I. Technology of ceramic micro and ultrafiltration membranes (Review) / Yu. I. Komolikov, L. A. Blaginina // Refractories and Industrial Ceramics. – 2002. – Vol. 43, Iss. 5/6. – P. 181–187.
5. Комоликов Ю. И. Технология керамических микро- и ультрафильтрационных мембран (обзор) / Ю. И. Комоликов, Л. Л. Благинина // Огнеупоры и техническая керамика. – 2002. – № 5. – С. 20–28.
6. Вавилов В. П. Неразрушающий контроль. Справочник. В 7 т. Т. 5, кн. 1 / В. П. Вавилов ; под общ. ред. В. В. Клюева. – Москва : Машиностроение, 2004. – 418 с.
7. Vavilov V. P. Thermal nondestructive testing of materials and products: a review / V. P. Vavilov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2017. – Vol. 53, Iss. 10. – P. 707–730.
8. Новые идеи в активном тепловом контроле / В. П. Вавилов, А. О. Чулков, Д. А. Дерусова, Пань Янян // В мире неразрушающего контроля. – 2016. – № 1 – С. 5–7.
9. Вандельт М. Активная термография – эффективный метод неразрушающего контроля крупногабаритных изделий из композиционных материалов / М. Вандельт, Т. Крёгер, М. Йоханнес // В мире неразрушающего контроля. – 2016. – № 1 – С. 8–12.
10. Non-Destructive Infrared Lock-in Thermal Tests: Update on the Current Defect Detectability / A. R. Silva, M. Vaz, S. R. Leite, J. Mendes // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2019. – Vol. 55, Iss. 10. – P. 772–784.

УДК 621.396

Журавлев Д.В., Ищенко Е.А., Фёдоров С.М.

НИЗКОПРОФИЛЬНАЯ ЩЕЛЕВАЯ АНТЕННА ИНТЕГРИРОВАННАЯ С СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛЬЮ

Аннотация. В статье рассматривается низкопрофильная щелевая волноводная антенна, установленная в конструкцию из солнечных панелей, что позволяет обеспечить связь в труднодоступных регионах, а также обеспечение энергоснабжения за счет использования солнечной энергии. Применяемая в конструкции антенна обладает резонансными частотами 11.6 ГГц и 14.25 ГГц; высоким уровнем КНД. Применение антенн, интегрированных в солнечную панель, позволяет достичь новых технологических и энергетических результатов для обеспечения связи в труднодоступных регионах.

Ключевые слова: щелевая антенна, солнечная панель.

Abstract. The article discusses a low-profile slotted waveguide antenna installed in a structure of solar panels, which allows communication in hard-to-reach regions, as well as ensuring power supply through the use of solar energy. The antenna used in the design has resonant frequencies of 11.6 GHz and 14.25 GHz; high level of CPI. The use of antennas integrated into the solar panel allows achieving new technological and energy results to ensure communication in hard-to-reach regions.

Keywords: slot antenna, solar panel.

Введение

В настоящее время наблюдается постоянно растущий интерес к беспроводным устройствам с низким энергопотреблением, предназначенным для использования в системах интернета вещей или мониторинга жизненных показателей организма. Доступ к системам беспроводной связи может быть ограничен из-за большой удаленности от базовой станции. Поэтому актуальным является разработка радиоустройств, которые могут собирать энергию из окружающей среды, тем самым снижая нагрузку на аккумулятор и снижая эксплуатационные расходы. Однако, подобные устройства часто предполагают использование отдельных фотоэлектрических элементов и антенн, что требует решения ряда проблем, связанных с ограниченным пространством и взаимным влиянием.

Одним из решений является интеграция антенн с солнечными элементами, обычно реализуемая в одной из пяти форм:

1. Солнечный элемент просто расположен над излучающим элементом или над заземляющей плоскостью, оставляя некоторое пространство вокруг антенны для обеспечения возможности генерации излучения.

2. Солнечный элемент используемся в качестве опоры для антенны, например, служит параболическим отражателем. Такое решение имеет

ограниченное применение, поскольку высоко сфокусированные диаграммы направленности затрудняют поддержание качественной радиосвязи.

3. Солнечная панель используется в качестве излучающего элемента антенны, тем самым уменьшая вес устройства в целом. Недостатком является необходимость создания металлической плоскости заземления.

4. Солнечный элемент используется в качестве заземления для металлической антенны. Данное решение позволяет снизить стоимость устройства. Однако затенение антенной солнечного элемента отрицательно скажется на его выходной мощности, а влияние солнечного элемента может затруднить согласование антенно-фидерного тракта.

5. Полностью интегрированная солнечная антенна, в которой солнечный элемент образует излучающий элемент; при этом дополнительная металлизация для генерации излучения не требуется. Компромиссным решением является уменьшение расстояние между солнечными панелями и антенной с целью достижения высокой эффективности совместной работы. Это решение выглядит наиболее привлекательным из-за снижения стоимости и веса устройства.

Конструкция антенны

В качестве антенного элемента была выбрана низкопрофильная гофрированная прямоугольная антенна, хорошо подходящая для интеграции в устройства для беспроводных сетей (рис. 1).

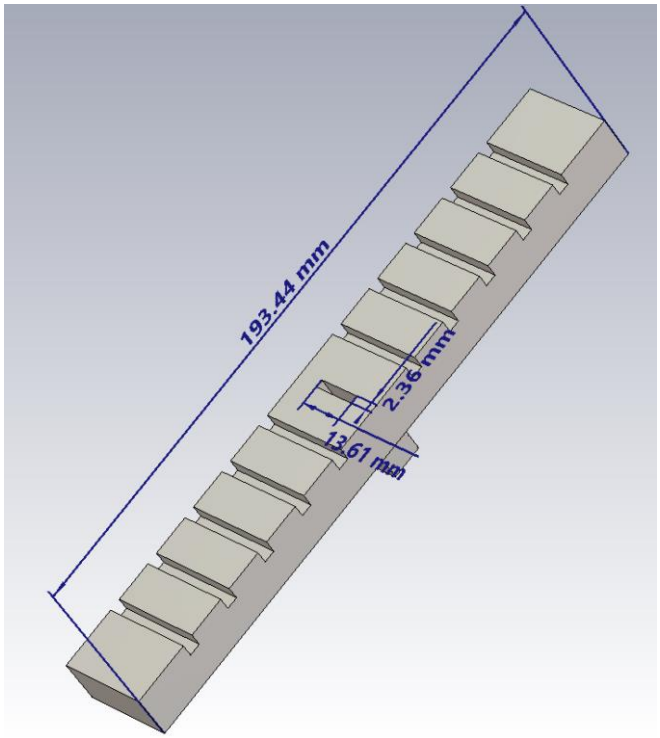


Рисунок 1 – Низкопрофильная гофрированная прямоугольная антенна

Низкопрофильная гофрированная антенна состоит из щели размером меньше длины волны, окруженной гофрированными прорезями в прямоугольной проводящей металлической пластине. Антенна питается через волновод, расположенный на нижней стороне металлической пластины с центром под апертурой. Длинная грань апертуры, которая в значительной степени определяет частоту, обладает размером ~0,64λ_0. В самой компактной исполнении максимальный размер антенны составляет примерно 3,3λ_0.

При математическом моделировании антенна запитывалась через стандартный волноводный порт, в то время как на практике она будет либо подключена к волноводу, либо запитана с помощью коаксиально-волноводного перехода.

Мощность подводится к излучающей апертуре через прямоугольный волновод с помощью TE_{10} моды. Толщина пластины (глубина апертуры) определяет резонансную частоту. Луч фокусируется с помощью резонансных гофр в проводящей металлической пластине, приблизительная глубина которой определяется величиной $Ds \sim (2n+1)\lambda/4$, где $n = 0, 1, 2 \ldots$. Ширина гофр и расстояние между гофрами и проемом также влияют на диаграмму направленности.

Рассматриваемая антенна обеспечивает коэффициент усиления примерно 10,5 дБи при ширине луча по уровню половинной мощности примерно 34° в плоскости E и 60° в плоскости H на центральной частоте (рис. 2). Увеличение числа гофр увеличивает усиление и выравнивает луч в E-плоскости. Однако увеличение количества гофр до значения, превышающего 5, приводит к снижению осевого усиления и более кардиоидной диаграмме направленности

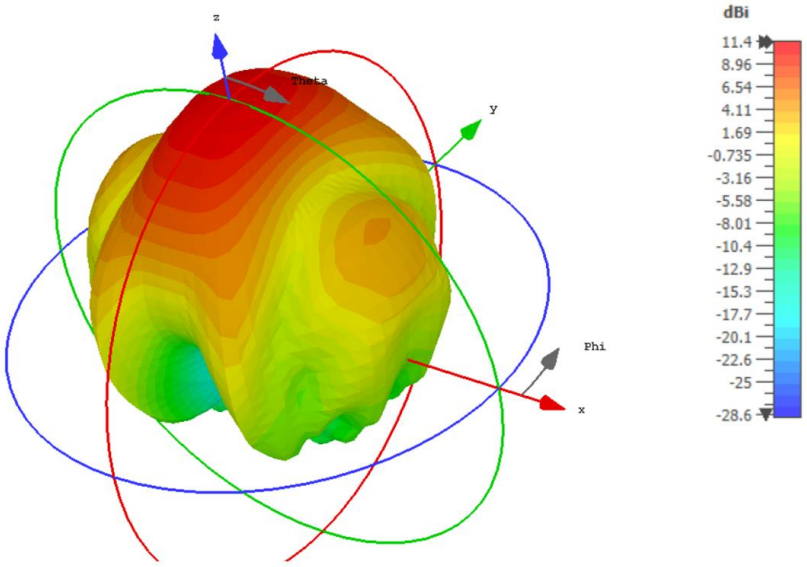


Рисунок 2 – Диаграмма направленности одиночной низкопрофильной щелевой антенны

Интеграция устройств была реализована путем размещения четырех низкопрофильных антенных элементов в зазорах между солнечными панелями для обеспечения максимальной инсоляции (рис. 3). При индивидуальной запитки антенн можно изменять их поляризацию или переключатся между лучами, улучшая потенциальное покрытие беспроводной системы связи.

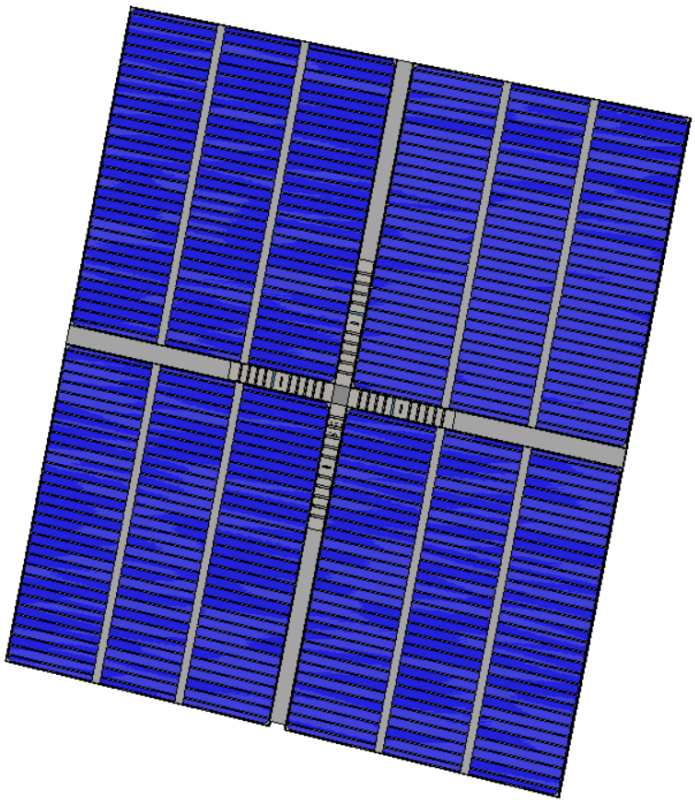
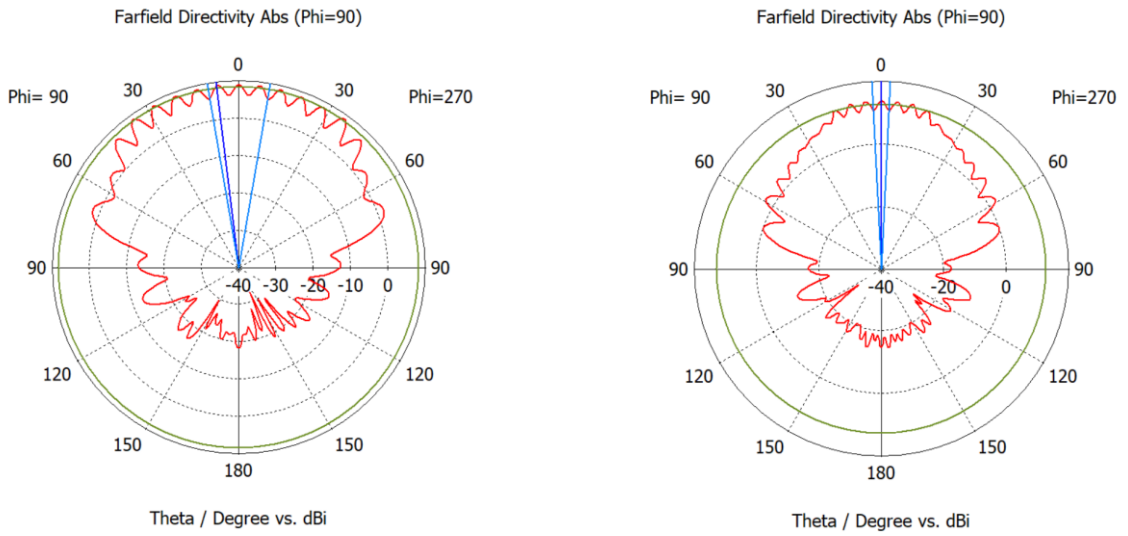


Рисунок 3 – Интеграция антенны и солнечных панелей

На рис. 4 показаны диаграммы направленности разработанной конструкции при синфазной запитке всех антенных элементов. Коэффициент усиления в направлении главного лепестка диаграммы направленности на частоте на частоте 11,6 ГГц равен 11,6 дБи, а на частоте 14,25 ГГц равен 13,8 дБи. При запитке антенных элементов со сдвигом фазы 90 градусов относительно друг друга мы можем реализовать круговую поляризацию антенны. Сигналы с круговой поляризацией менее чувствительны к потерям из-за рассогласования поляризации, что полезно для систем с подвижными объектами (мобильная связь, управление БПЛА).



а) б)

Рисунок 4 – Диаграммы направленности антенны, интегрированной с солнечными панелями: а) 11,6 ГГц; б) 14, 25 ГГц

S-параметры, характеризующие согласование антенны с фидерным трактом приведены на рис. 5. Из графиков видно, что коэффициент отражения не поднимается выше -15 дБ на рабочих частотах антенны, интегрированной с солнечной панелью.

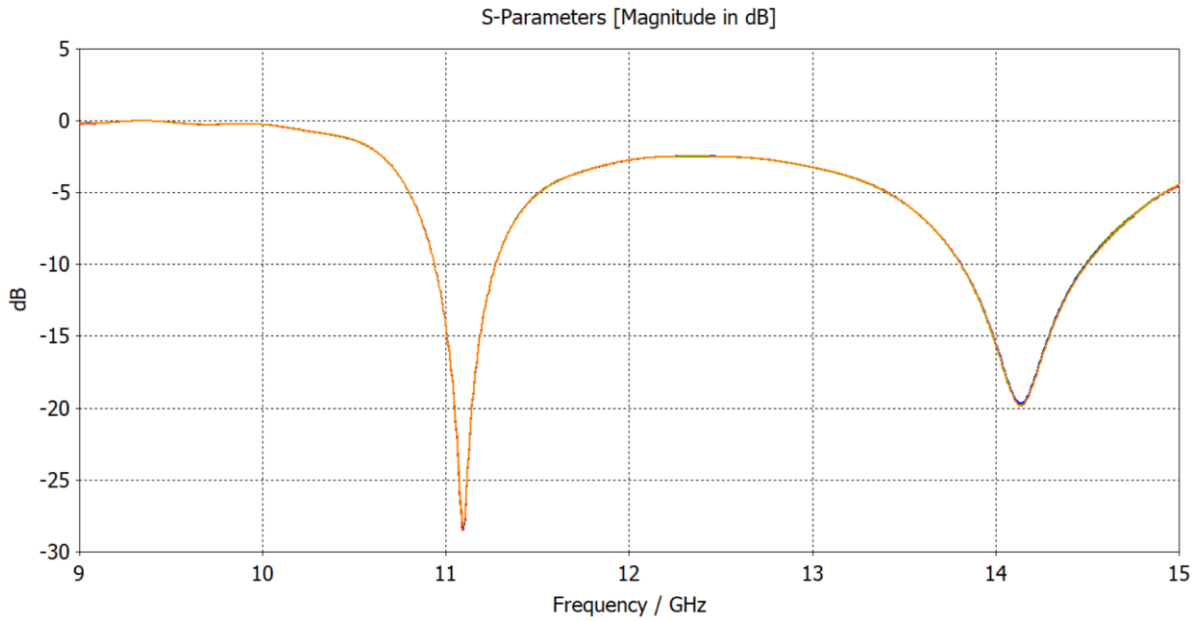


Рисунок 5 – Зависимость коэффициент отражения от частоты

Заключение

В настоящее время интеграция солнечных панелей и антенных систем используется в основном на спутниках, так как это позволяет экономить место.

Преимуществом предлагаемого решения является интеграция антенных элементов с солнечными панелями, что позволит более эффективно использовать окружающее пространство, произвести интеграцию современных технологий в городскую среду. Совместное размещение базовых станций, антенн и солнечных панелей позволяет обеспечить резервное питание в случае отключения постоянного, а в отсутствие потребности в резервном питании солнечные панели могут накапливать энергию, которая может быть использована в качестве источника питания уличных фонарей, осветителей знаков дорожного движения (пешеходных переходов). Подобная интеграция для спутниковой связи позволяет обеспечить бесперебойную спутниковую связь в труднодоступных регионах, где отсутствует покрытие мобильной сетью. Также крупным преимуществом является использование планарных антенн для спутниковой связи и сетей 5G, так как антенны, изготовленные по данной технологии, имеют меньшую себестоимость в процессе производства, что позволяет добиться более высокой экономической эффективности.

Библиографический список

1. O'Conchubhair O. Integration of Antennas and Solar cells for Low Power Wireless Systems. Doctoral Thesis / O. O'Conchubhair. – Dublin : Technological University Dublin, 2016. – 115 p.
2. Roos Ons M. J. Integration of Antennas and Solar Cells for Autonomous Communication Systems. Doctoral Thesis / M. J. Roos Ons. – Dublin : Technological University Dublin, 2010. – 142 p.

УДК 65.01

Гаранина Е.В., Белых Т.А.

УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ КАЛИБРОВОЧНОЙ ЛАБОРАТОРИИ КАК ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД К МЕНЕДЖМЕНТУ КОМПАНИИ ООО «WEATHERFORD»

Аннотация. В статье описаны цели, задачи, определение и анализ типовых рисков как инновационный подход к управлению при поверке средств измерений в метрологической лаборатории.

Ключевые слова: риск; калибровочная лаборатория; идентификация; управление рисками.

Abstract. This article describes the goals, objectives, definition and analysis of typical risks as an innovative approach to management in the verification of measuring instruments in a metrological laboratory.

Keywords: risk; calibration laboratory; identification; management of risks.

Управление риском – это важная часть общего управления любым предприятием, которое стремиться выжить и осуществить свою миссию. В настоящее время одним из способов повышения устойчивого развития предприятия является оценка потенциальных рисков. Поэтому менеджмент риска внедряется повсеместно, в том числе и в деятельность метрологических служб. Риски и возможности не всегда ярко выражены и легко идентифицируемы. Управление рисками должно осуществляться на всех уровнях компании, включать взаимодействие со стейкхолдерами, а также учитывать внешние и внутренние факторы. В связи с этим целью настоящей работы является идентификация и анализ типовых рисков калибровочной лаборатории. Идентификация рисков позволяет более полно учитывать внутренние и внешние факторы риска в деятельности МС, определяет пути обеспечения устойчивости, способности противостоять неблагоприятным ситуациям [1]. Результатом идентификации является перечень рисков и возможностей на этапах поверки СИ.

Процесс управления рисками состоит из восьми основных стадий. Разберём более подробно каждую стадию.

1. Выбор объекта управления рисками.

Под объектом управления рисками подразумевается процесс/группа процессов метрологической службы, подвергаемые процедуре управления рисками. В Нашем случае за объектом будет являться калибровочная лаборатория.

2. Формирование группы внутренних экспертов. Выбор членов группы экспертов является ключевым фактором успеха реализации методики управления

рисками. Ввиду того, что группа внутренних экспертов устанавливает риски, которые должны быть предотвращены или снижены до приемлемого уровня, выявляет причины возникновения этих рисков и участвует в разработке стратегии по предотвращению или снижению выявленных и оцененных рисков, члены данной группы должны быть компетентны и надлежащим образом осведомлены в области функционирования объекта управления рисками.

3. Определение необходимых ресурсов. В зависимости от целей исследования необходимо определить количество выделяемых временных, материально-технических и финансовых ресурсов для эффективной реализации процесса управления рисками.

4. Установление критериев риска. Для количественной оценки критичности опасности определяется значение приоритетности риска – RPN как произведение средних значений тяжести последствий, вероятности появления и вероятности обнаружения риска. Показатели для расчета RPN определяются с помощью метода экспертных оценок по 10-балльной шкале. Таким образом, RPN может принимать значения от 1 до 1000. Далее производится оценка критичности того или иного выявленного риска. Это позволяет ранжировать риски и в дальнейшем разрабатывать предупреждающие действия, соответствующие полученной степени значимости риска, что обеспечивает экономию ресурсов.

5. Идентификация источников риска. Это процесс обнаружения, распознавания и описания источников рисков, событий их причин и возможных последствий. Цель данного этапа заключается в составлении перечня рисков, основанных на тех событиях, которые могут создавать, повышать, предотвращать, снижать, ускорять или задерживать достижение целей. Идентификация является критически важной, потому что риск, который не был идентифицирован на данном этапе, не будет включен в будущий анализ. Для сбора информации о рисках могут применяться различные методы (статистический метод , метод экспертных оценок, метод мозгового штурма, FMEA-анализ, метод Дельфи, карточки Кроуфорда, метод «Галстук-бабочка» и др.) [2] При выявлении рисков в калибровочной лаборатории наиболее подходящими являются следующие методы: метод экспертных оценок – специалисты соответствующих направлений деятельности коллегиально оценивают вероятность появления риска и степень его воздействия; статистический метод – анализ статистических данных для определения вероятности возникновения рисков; метод мозгового штурма – оперативный метод идентификации рисков на основе стимулирования творческой активности, при котором участникам обсуждения предлагают высказывать как можно большее количество вариантов рисков.

6. Анализ факторов среды. Следует определить факторы среды (внешние и внутренние), влияющие на работу калибровочной лаборатории. К внешним

относятся факторы, не связанные с деятельностью предприятия, такие как природные, техногенные, политические, экономические и т.д. Внутренние факторы – это причины производственных потерь, находящиеся внутри калибровочной лаборатории.

Примером одного из внутренних факторов является оснащенность калибровочной лаборатории, то есть насколько современные и точные СИ используются на предприятии. Одним из внешних факторов может быть законодательство в области обеспечения единства измерений, то есть весь процесс калибровки должен проводиться в заданных условиях, персоналом соответствующей квалификации, а результаты измерений фиксироваться и оформляться в соответствии с нормами и требованиями, указанными в нормативных документах по обеспечению единства измерений.

7. Анализ заинтересованных сторон и их требований. Необходимо определить все заинтересованные стороны, имеющих отношение к калибровочной лаборатории и деятельности метрологической службы. Требования заинтересованных сторон регламентируются в определенных нормативных документах, таких как приказы Федерального агентства по техническому регулированию, в стандартах организации, методиках поверки СИ и других. Далее они должны быть учтены во всех аспектах разработки и функционирования СМК. Возможные участники данного процесса: органы власти (Минэкономразвития РФ, Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, Росаккредитация и др.); вышестоящие организации; центры стандартизации метрологии; институты метрологии; предприятия-поставщики СИ; работники структурных подразделений. Требования заинтересованных сторон регламентируются следующими документами: приказы, стандарты организаций, договора на оказание услуг, приказы, методики поверки СИ, стандарты предприятия.

8. Анализ и оценка рисков, построение матрицы рисков.

На основе проведенного анализа факторов среды, заинтересованных сторон и их требований составляется перечень типовых рисков и возможностей. Данный перечень содержит основные риски калибровочной лаборатории и возможности для снижения и предотвращения рисков. Пример перечня приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Пример перечня типовых рисков и возможностей калибровочной лаборатории

п/п	Типовой риск	Возможности снижения риска
1	2	3
1	Риск беспристрастности	Политика по беспристрастности или заявление о беспристрастности в политике качества и обсуждение беспристрастности в контексте анализа со стороны руководства, а также включение обсуждений и решений в протоколы заседаний.
2	Риск компетентности	Руководство лабораторией должно гарантировать компетентность всех, кто работает со специальным оборудованием, проводит испытания и калибровки, оценивает результаты и подписывает отчеты об испытаниях и сертификаты калибровок. За стажем должен быть обеспечен соответствующий надзор.
3	Риск окружающей среды и помещения	Соблюдение санитарных норм, влажности, температуры, освещенности, уровня шума и вибрации применительно к соответствующей технической деятельности. Испытания и калибровки должны быть прекращены, если условия окружающей среды подвергают сомнению результаты испытаний и/или калибровок.
4	Риск оборудования	Перед выполнением работы соотнести методики измерений и испытаний с соответствующими средствами измерений, иметь процедуры обращения с оборудованием, его транспортировки, хранения, эксплуатации и планового обслуживания.

Продолжение таблицы 1

1	2	3
5	Риск продукции и услуг, предоставляемых внешними поставщиками	Необходимо определять, рассматривать и утверждать требования к продукции и услугам, предоставляемым внешними поставщиками и осуществлять какие-либо действия по результатам оценивания, мониторинга деятельности и периодического оценивания внешних поставщиков.
6	Риски, появляющиеся во время процесса лабораторной деятельности	Соблюдать все требования к операции подготовки, проведения испытаний, включая порядок отбора, подготовки и хранения.
7	Применение устаревших методов и методик измерений	Планирование в бюджет отдела приобретение необходимых методик поверки СИ. Унификация протоколов поверки СИ (приведение к единой форме).
8	Риск транспортировки эталонов	Использование специальных креплений/обрешеток, оценка стоимости оборудования перед транспортировкой и оценка состояния оборудования после транспортировки, сопровождение квалифицированным персоналом.
9	Риски ошибок оформления протоколов калибровки	Повышение квалификации работников.
10	Риск взаимозаменяемости эталонов	Создание базы дублирующих эталонов, согласование с заказчиком даты проведения калибровки.

Анализ и оценка рисков. Данная стадия заключается в определении уровня риска для каждой выявленной опасности, влияющей на процесс. Для количественной оценки критичности опасности определяется значение приоритетности риска.

Риску присваивается одна из характеристик: «неприемлемый риск», «критический риск», «умеренный риск», «незначительный риск», представлены в таблице 2.

Цель данного этапа – установление приоритетов и тех рисков, которые должны быть предотвращены или снижены до приемлемого уровня.

Таблица 2 – Характеристика рисков

п/п	Типовой риск	Воздействие	Вероятность	Характеристика рисков
1	Риск беспристрастности	Значительное	Средняя	Критический риск
2	Риск компетентности	Критическое	Низкая	Критический риск
3	Риск окружающей среды и помещения	Критическое	Высокая	Неприемлемый риск
4	Риск оборудования	Значительное	Низкая	Умеренный риск
5	Риск продукции и услуг, предоставляемых внешними поставщиками	Значительное	Низкая	Умеренный риск
6	Риски, появляющиеся во время процесса лабораторной деятельности	Значительное	Средняя	Критический риск
7	Применение устаревших методов и методик измерений	Значительное	Очень низкая	Умеренный риск
8	Риск транспортировки эталонов	Критическое	Очень высокая	Неприемлемый риск
9	Риски ошибок оформления протоколов калибровки	Среднее	Низкая	Умеренный риск
10	Риск взаимозаменяемости эталонов	Среднее	Очень низкая	Незначительный риск

На основании анализа и оценки рисков составляется матрица рисков, представленная на рисунке 1[3].

Воздействие / Вероятность	Критическое	Значительное	Среднее	Минимальное
Очень высокая	Неприемлемый риск 8		Критический риск	Умеренный риск
Высокая	3			
Средняя		1,6		
Низкая	2 Критический риск	4,5	9	
Очень низкая		7	10	
Пренебрежимо малая	Умеренный риск			Незначительный риск

Рисунок 1 – Матрица рисков

Риски, которые вошли в категории «неприемлемый риск» и «критический риск», должны быть предотвращены или снижены до уровня «умеренный риск» и «незначительный риск».

Мониторинг рисков и возможностей должен осуществляться ежегодно с целью идентификации всех произошедших изменений. Это позволит выявить новые риски, использовать недоступные ранее возможности, разработать новые мероприятия, оптимизировать существующие виды деятельности и т.п.

Управление рисками в метрологической службе необходимо осуществлять в рамках процессного подхода, с учетом специфики отрасли с использованием современных эффективных методов управления и организаций производства, а также с использованием инструментов менеджмента риска. В целях эффективной оценки рисков для процесса поверки СИ необходима идентификация рисков, которая заключается в комплексном подходе: необходимо учитывать, как внешние, так и внутренние факторы среды, требования заинтересованных сторон.

Разработанный перечень типовых рисков и возможностей поверки средств измерений поможет метрологическим службам оценить свои риски и возможности, что в свою очередь, приведет к повышению уровня идентификации и оценки рисков в метрологических службах.

Проведенный анализ методов идентификации рисков и влияющих факторов среды позволил составить перечень типовых рисков. Представлены мероприятия для исключения данных рисков. Составлена матрица рисков на основании которой установлены приоритеты тех рисков, которые должны быть предотвращены или снижены до приемлемого уровня. Ежегодный мониторинг рисков позволит выявить новые риски, идентифицировать всех произошедшие изменения,

разработать новые мероприятия, оптимизировать существующие виды деятельности.

Библиографический список

1. ГОСТ ИСО/МЭК 17025–2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий (Переиздание) : дата введ. 2019–09–01. – Москва : Стандартинформ, 2019. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200166732 (дата обращения: 13.04.2021).
2. ИСО 9000–2015. Система менеджмента качества. Основные положения и словарь : дата введ. 2015–11–01. – Москва : Стандартинформ, 2015. – URL: http://docs.cntd.ru/document/1200124393 (дата обращения: 17.04.2021).
3. ГОСТ Р ИСО 31000–2019. Менеджмент риска. Принципы и руководство : дата введ. 2020–03–01. – Москва : Стандартинформ, 2020. – URL: http://docs.cntd.ru/document/1200170125 (дата обращения: 15.04.2021).

УДК 621.039.5

Глухов С.М., Лёзов А.Д., Шумков Д.Е., Климова В.А., Ташлыков О.Л.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПАССИВНОГО ОТВОДА ТЕПЛА ОТ ШАХТЫ-ХРАНИЛИЩА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ИВВ-2М ПРИ ПОМОЩИ ТЕРМОСИФОНОВ

Аннотация. На основании проведенного в предыдущих исследованиях расчета мощности остаточных тепловыделений отработавших топливных сборок (ОТВС), расположенных в шахте-хранилище исследовательской ядерной установки, предложена схема отвода теплоты с использованием пассивных систем (термосифонов). Выполнено теплогидравлическое моделирование конденсационной части термосифонов с использованием вытяжных труб различных геометрических форм, а также без них. Получена зависимость теплоотдачи от конденсационной части термосифона к окружающему воздуху при разных его температурах.

Ключевые слова: остаточное тепловыделение ОТВС, пассивная система безопасности, двухфазный термосифон, вытяжные трубы, шахта-хранилище.

Abstract. Based on the calculation of the residual heat output capacity of spent fuel assemblies (SFAS) located in the storage shaft of a research nuclear installation, a scheme for heat removal using passive systems (thermosiphons) is proposed. Thermohydraulic simulation of the condensing part of thermosyphons is performed using stacks of various geometric shapes, as well as without them. The dependence of the heat transfer from the condensation part of the thermosiphon to the ambient air at different temperatures is obtained.

Keywords: residual heat generation of SFAS, passive safety system, two-phase thermosiphon, stacks, storage pit.

Введение

Безальтернативным условием использования атомной энергии и ионизирующих излучений является безопасность персонала и населения [1].

В соответствии с НП-033-11 «Общие положения обеспечения безопасности исследовательских ядерных установок», целью обеспечения безопасности ИЯУ является ограничение радиационного воздействия ИЯУ на работников (персонал), население и окружающую среду при нормальной эксплуатации и нарушениях нормальной эксплуатации, включая аварии.

Авария, произошедшая 11 марта 2011 г. на японской АЭС Фукусима-1, сопровождалась потерей теплоносителя первого контура, перегревом и плавлением тепловыделяющих элементов, образованием в результате пароциркониевой реакции водорода с последующим взрывом гремучей смеси, вызвавшим пожары и радиоактивное загрязнение окружающей среды. Взрыв стал причиной неработоспособности всех систем штатного и аварийного

расхолаживания станции, что привело к расплавлению активных зон трех энергоблоков и повреждению отработавших ТВС в бассейнах выдержки.

Важным уроком этой аварии стало то, что для обеспечения безопасности ядерных энергетических объектов нельзя пренебрегать учетом даже таких факторов риска, проявление которых считается крайне маловероятным. Таким фактором при проектировании АЭС Фукусима-1 считалось полное долговременное обесточивание энергоблока. Тем не менее, это событие произошло из-за землетрясения, вызванного им цунами и неудачного размещения на атомной электростанции аварийных дизель-генераторов.

После аварии на АЭС Фукусима-1 произошло кардинальное реформирование концепции безопасности ядерных энергетических установок на всех стадиях их использования. МАГАТЭ выпустило обновленные документы, регламентирующие безопасность АЭС. Аналогичные требования предъявляются к исследовательским ядерным установкам, таким как реактор ИВВ-2М, расположенный в городе Заречный Свердловской области.

Объект исследования

Ядерная безопасность исследовательских ядерных установок (ИЯУ) определяется сохранностью герметичности оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), как при работе реактора, так и при хранении отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС). Для этого должно быть обеспечено их надежное охлаждение как при нормальных условиях эксплуатации, так и в аварийных, в том числе с потерей электроснабжения.

ИЯУ в составе которой предусмотрены исследовательский реактор либо критическая сборка или подкритическая сборка и комплекс помещений, систем, элементов и экспериментальных устройств, с необходимыми работниками (персоналом), располагающаяся в пределах определенной проектом территории (площадки ИЯУ), предназначена для использования нейтронов и ионизирующего излучения в исследовательских целях.

ИВВ-2М – гетерогенный водо-водяной исследовательский ядерный реактор бассейнового типа с секционированной активной зоной. Реактор работает в номинальном режиме с мощностью 15 МВт. В реакторе используется от 36 до 42 штук шестигранных тепловыделяющих сборок с металлокерамическим топливом. Теплоноситель первого контура – химобессоленная вода, теплоноситель второго контура – техническая вода, подаваемая из Белоярского водохранилища.

Комплекс с ИЯУ ИВВ-2М предназначен для решения задач в области ядерной физики и физики твердого тела, проведения исследований конструкционных материалов и материалов биологической защиты, наработки

радиоактивных изотопов. [2], [3].

После выработки ресурса ТВС из активной зоны ИВВ-2М перегружают в шахту-хранилище (бассейн выдержки) облученных топливных сборок (ОТВС). Шахта-хранилище ОТВС представляет собой прямоугольный бак из коррозионностойкой стали, заглубленный в бетон. Шахта хранилище (ШХ) вмещает до 228 ТВС, имеется дополнительный пенал для аварийных и разгерметизированных ОТВС. ОТВС в шахте размещают в три яруса.

Шахта оборудована системой очистки и охлаждения теплоносителя (СООТ), которая предназначена для снятия остаточного энерговыделения с ОТВС и поддержания требуемого водно-химического режима и температуры теплоносителя в ШХ.

В состав СООТ шахты-хранилища ОТВС входит следующее оборудование: трубопроводы с запорно-регулирующей арматурой и пробоотборными линиями, теплообменник, насос, группы механических и ионообменных фильтров.

Теплообменник предназначен для охлаждения воды ШХ и передачи тепла воде поступающей из системы технического водоснабжения ИЯУ ИВВ-2М.

В случае экстремальной оперативной выгрузки в ШХ всех ТВС штатной активной зоны с повышенным остаточным тепловыделением, по консервативным оценкам суммарное энерговыделение ТВС в шахте-хранилище может составлять до 200 кВт [4].

Система очистки и охлаждения теплоносителя является активной, то есть в случае обесточивания ее работа прекращается. При этом следует учитывать, что тепло от ОТВС будет отводиться за счет теплопроводности и рассеяния в строительных конструкциях. Согласно проведенной оценке рассеяния теплоты через окружающие шахту строительные конструкции [5], мощность отвода теплоты через дно шахты-хранилища составит от 57,7 до 418 Вт, а через стены – от 0,6 до 10 кВт. Некоторое количество теплоты будет отводиться за счет испарения части воды из бака ШХ.

В работе [6] была подробно рассмотрена штатная система охлаждения шахты-хранилища ИВВ-2М, в которой используется змеевиковый теплообменник, и была проведена оценка эффективности этой системы. Также в работе [6] был проведен анализ остаточных энерговыделений в шахте-хранилище облученных тепловыделяющих сборок, который показал, что выдержка ТВС в ШХ необходима для снижения энерговыделений.

Оборудование, методы и технологии

Повысить надежность охлаждения ОТВС в шахте-хранилище позволит использование системы пассивного отвода теплоты с термосифонами или тепловыми трубами [7].

Термосифоны – это автономные замкнутые двухфазные устройства для передачи тепла, теплопроводящие свойства которых выше, за счет фазового перехода, чем у металлов с максимальной теплопроводностью. Принцип действия тепловых труб и термосифонов заключается в реализации внутри герметичного корпуса испарительно-конденсационного цикла и переноса тепла в виде скрытой теплоты парообразования путем циркуляции паровой и жидкой фаз между зонами нагрева и охлаждения [8]. В двухфазных термосифонах возврат жидкости из конденсатора в испаритель происходит под действием гравитационных сил, поэтому испаритель должен располагаться ниже конденсатора.

Термосифон или тепловая труба характеризуются тепловой мощностью (количеством отводимой теплоты) и рабочими температурами. Следовательно, для создания системы пассивного отвода теплоты нужно подобрать термосифоны, которые будут наиболее эффективны в заданных условиях работы. Термическое сопротивление термосифона складывается из:

- термического сопротивления передачи теплоты от окружающей среды к стенке термосифона,
- термического сопротивления стенки,
- сопротивления фазового перехода,
- термического сопротивления, связанного с перепадом температур вдоль парового канала.

Эти величины получают расчетными или экспериментальными методами.

Обладая простотой конструкции, автономностью и наличием двойного высокотеплопроводного барьера между охлаждаемой нагреваемой средой, термосифоны являются эффективными теплопередающими элементами в различных системах, требующих повышенной надёжности.

Анализ режима работы шахты-хранилища показал, что температура воды в ней в штатном режиме лежит в диапазоне от 30°С до 50°С. На основании этих данных был выбран теплоноситель для системы пассивного отвода теплоты. Большей частью в качестве теплоносителя в термосифонах используется вода, однако при атмосферном давлении температура кипения ее гораздо выше температуры в баке ШХ. Применение термосифонов с разрежением может сопровождаться потерей работоспособности при появлении неплотностей. Поэтому для исследования в качестве теплоносителя для термосифона был выбран ацетон, температура кипения которого равна 56,2°С.

В данной работе рассматривается система пассивного отвода теплоты на основе термосифонов, которую можно установить в шахту-хранилище (рис. 1). Испарительная часть термосифонов погружена в воду ШХ, конденсационная часть выведена за пределы здания [9].

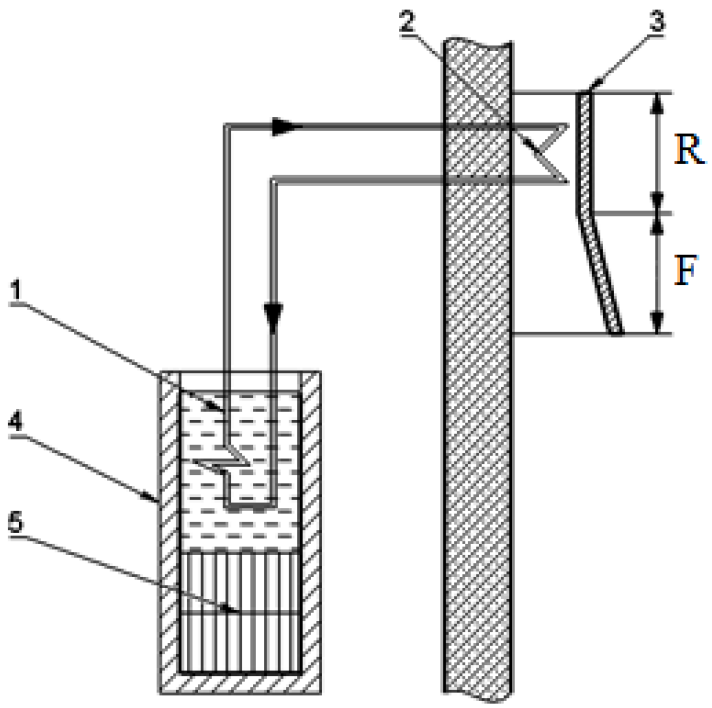


Рисунок 1 – Схема размещения пассивной системы отвода теплоты с термосифонами: 1 – испарительная часть; 2 – конденсационная часть; 3 – вытяжная труба; 4 – шахта-хранилище; 5 – ОТВС

В данной работе было проведено компьютерное моделирование теплообмена между конденсационной частью термосифона (рис. 2), выведенной за пределы здания, и атмосферным воздухом. Для моделирования использовался пакет вычислительной гидродинамики SolidWorks Flow Simulation.

Программный пакет Flow Simulation предназначен для параметрического моделирования гидродинамики и теплообмена, использующий законы сохранения массы, импульса и энергии. Для численного решения задач используется метод конечных объемов. Пакет Flow Simulation позволяет решать широкий круг задач, в число которых входят внутренние и внешние стационарные и нестационарные задачи, исследование свободной, вынужденной и смешанной конвекции, теплопроводность в твердых телах, теплообмен излучением, источники теплоты.

Разработчики пакета предлагают ряд примеров, подтверждающих возможности Flow Simulation при моделировании основных характеристик потоков. Результаты, полученные с помощью моделирования во Flow Simulation, сравниваются с экспериментальными данными разных авторов и данными узкоспециализированных расчетных кодов. Таким образом, SolidWorks Flow Simulation является надежным пакетом вычислительной динамики, с помощью которого можно решить задачи, поставленные в рамках данного исследования.

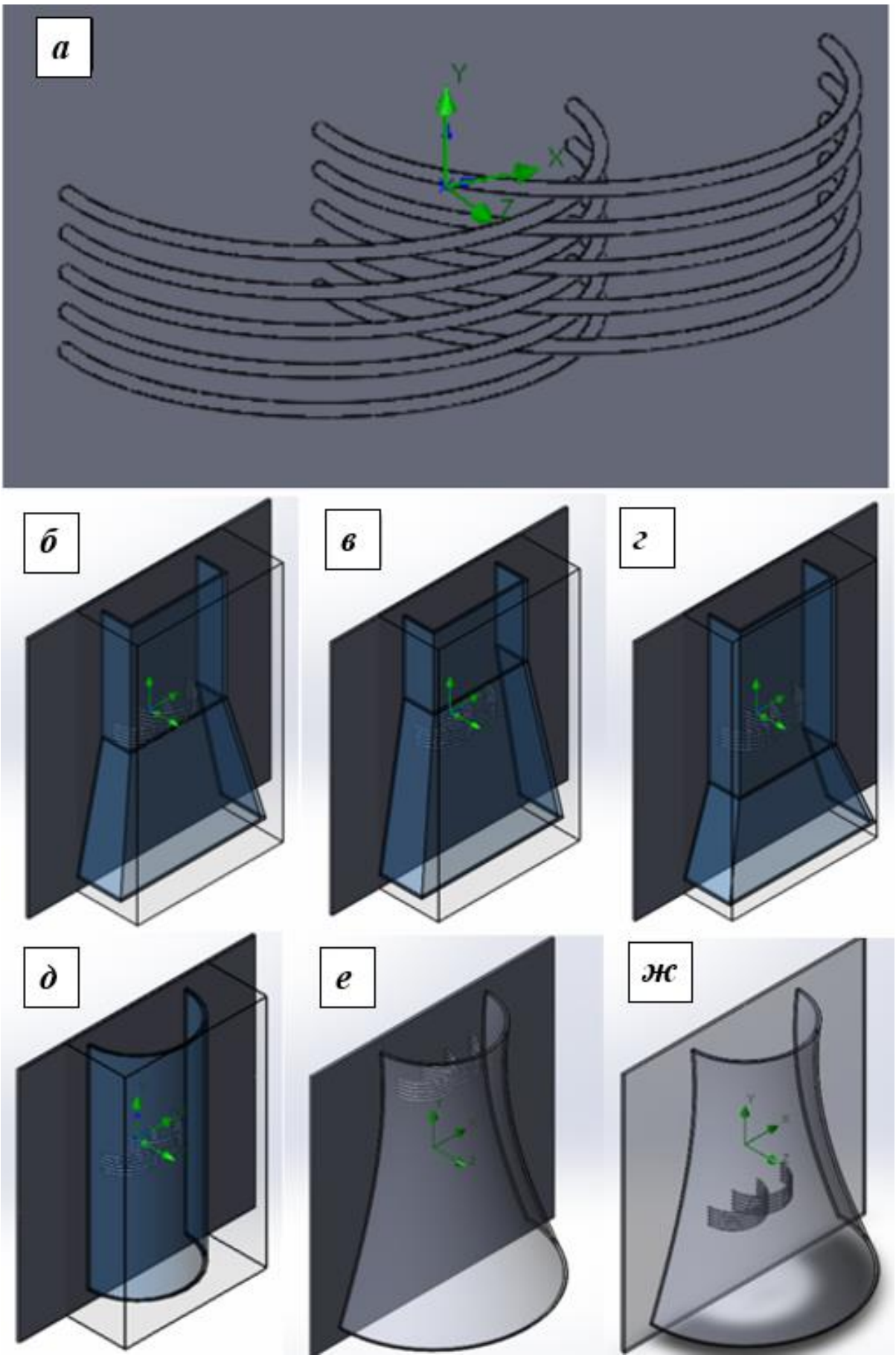


Рисунок 2 – Конденсационная часть термосифона (а), варианты геометрических форм вытяжной трубы, используемые при расчетах (б – ж)

Модель, показанная на рис. 2, а, состоит из десяти труб термосифона, расположенных на стене здания. Трубка имеет наружный диаметр 20 мм, выступающая часть (полуокружность) имеет радиус гиба 1 м, шаг между трубками в центральной части 30 мм. Отвод теплоты от трубки к окружающему воздуху происходит за счет естественной конвекции, поэтому при моделировании учитывалась гравитационная составляющая. Каждая трубка конденсационной части являлась поверхностным источником теплоты с постоянной температурой, равной температуре кипения ацетона.

В граничные условия также входила температура воздуха на границах расчетной области, которая выбиралась по характерным для Свердловской области, город Заречный, климатическим условиям.

Результаты и обсуждение

Отвод тепла от конденсационной части пассивной системы охлаждения исследовался при следующих условиях:

– использование вытяжной трубы различных геометрических форм;

– изменение температуры окружающего воздуха.

Первая часть исследования была направлена на выявление наиболее эффективной геометрической формы вытяжной трубы, позволяющей отвести наибольшее количество теплоты. Рассматривались шесть геометрических форм, представленные на рис. 2, а также вариант без вытяжной трубы. Влияние геометрической формы вытяжной трубы на теплоотвод от конденсационной части термосифона исследовалось при постоянной температуре окружающего воздуха, равной 20°С, что соответствует теплому времени года в г. Заречный.

По рассмотренным вариантам геометрических форм были проведены расчеты мощности тепловыделения Q, Вт, удельного теплового потока q, Вт/м^2, а также коэффициента теплоотдачи α, Вт/(м^2·К). Для прямоугольной формы R – высота верхней части вытяжной трубы, F – высота нижней части («юбки»). Полученные данные приведены в табл. 1.

По результатам моделирования выявлена наиболее эффективная с точки зрения отвода тепла геометрическая форма вытяжной трубы («***ж***»), выполненная в виде эллиптической конструкции с расположением трубок конденсационной части термосифонов в нижней части.

Второй этап заключался в исследовании эффективности теплоотвода в зависимости от температуры окружающей среды в разное время года. Целью расчета является выявление зависимости мощности теплоотвода от конденсационной части, расположенной в трубе наиболее эффективной геометрии («***ж***»), от температуры наружного воздуха, а также сравнение с вариантом без вытяжной трубы. Полученные данные позволяют сделать оценку эффективности

пассивных систем отвода остаточных тепловыделений в теплое время года. Для определения отведенной мощности также использовалось моделирование в пакете SolidWorks Flow Simulation.

Таблица 1 – Результаты расчета теплоотвода от конденсационной части термосифона для различных геометрических форм вытяжной трубы

Вариант (см. рис.2)	Геометрия вытяжной трубы	$q, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$	$\alpha, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	Q, Вт
а	Без вытяжной трубы	147,76	4,62	724
б	Прямоугольная F = 4,5; R = 4,5	166,53	5,21	816
в	Прямоугольная F = 6; R = 3	134,29	4,20	658
г	Прямоугольная F = 3; R = 6	133,47	4,18	654
д	Цилиндр	174,08	5,45	852
е	Эллиптическая (узкая часть)	167,76	5,25	822
ж	Эллиптическая (широкая часть)	174,29	5,45	854

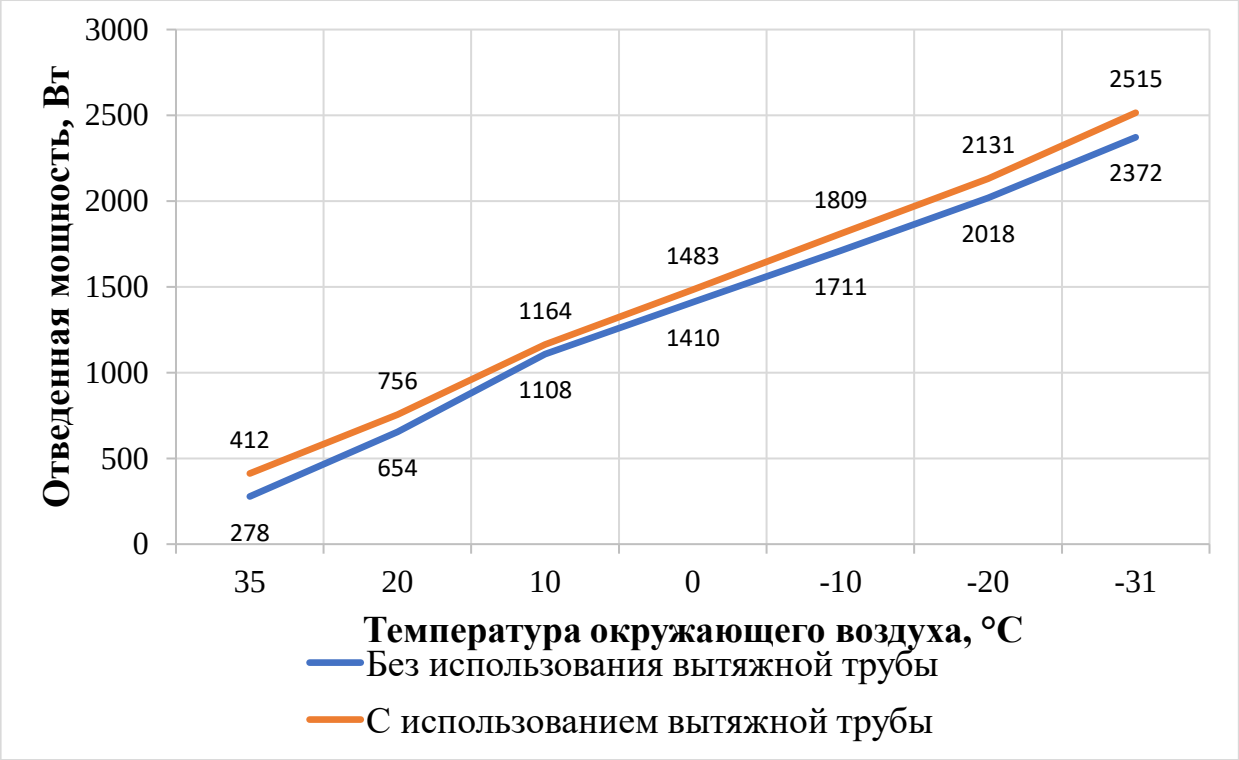


Рисунок 3 – Сравнение мощности теплоотвода конденсационной части термосифона с вытяжной трубой и без ее использования

На рис. 3. представлено сравнение рассчитанных мощностей теплоотвода от конденсационной части термосифона с использованием вытяжной трубы эллиптической формы и без вытяжной трубы.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что наличие вытяжной трубы повышает количество отводимого тепла в рассмотренном диапазоне температур окружающего воздуха. При высоких температурах вытяжная труба вносит существенный вклад в теплоотвод.

В реальных условиях нужно учитывать влияние солнечного излучения на теплообмен конденсационной части термосифона с окружающей средой. Вытяжная труба способна создать затенение, которое позволит избежать нагрева конденсационной части выше температуры кипения теплоносителя.

Заключение

В работе получены результаты исследования эффективности теплоотвода от конденсационной части термосифона с использованием различных геометрических форм вытяжных труб, а также без их использования.

Исследована зависимость теплоотвода от температуры окружающего воздуха на территории города Заречный Свердловской области.

По полученным данным выявлено:

1. Наиболее эффективная (из рассмотренных вариантов) с точки зрения теплоотвода геометрическая форма вытяжной трубы – эллиптическая с расположением трубок конденсатора термосифона в нижней части.

2. Наличие вытяжной трубы вносит положительный вклад в отвод теплоты от конденсационной части термосифона при любых температурах окружающего воздуха, причем для высоких температур относительный вклад выше.

Библиографический список

1. Новиков Г. А. Обеспечение безопасности в области использования атомной энергии : учебник / Г. А. Новиков, О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 552 с. – ISBN 978-5-7996-2125-4.
2. Экспериментально-теоретическое исследование органометаллических радиационно-защитных материалов, адаптированных к источникам излучения со сложным изотопным составом / И. М. Русских, Е. Н. Селезнев, О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин // Ядерная физика и инжиниринг. – 2014. – Т. 5, № 5. – С. 449–455.
3. Оптимизация состава гомогенных радиационно-защитных материалов применительно к планируемым условиям облучения / О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин, И. М. Русских [и др.] // Атомная энергия. – 2016. – Т. 121, № 4. – С. 233–236.
4. Оценка надежности охлаждения облученных топливных сборок

исследовательского ядерного реактора в шахте-хранилище / Д. Е. Шумков, О. Л. Ташлыков, С. Мингалимов, В. А. Климова // Физика. Технологии. Инновации : тез. докл. VI Междунар. молодеж. науч. конф., посвящ. 70-летию Физ.-техн. ин-та УрФУ (Екатеринбург, 20–24 мая 2019 г.). – Ектеринбург, 2019. – С. 925–926. – URL: https://elar.urfu.ru/handle/10995/68382 (дата обращения: 06.07.2020).

5. Расчетная оценка отвода остаточных тепловыделений от шахты-хранилища облученных топливных сборок в строительные конструкции / А. В. Куртеев, С. А. Нейская, М. М. Севастьянов, О. Л. Ташлыков // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика : материалы Междунар. конф. – Екатеринбург, 2018. – С. 828–833.
6. Numerical simulation of residual heat removal from the spent fuel assemblies storage pit / A. V. Kurteev, V. Klimova, M. Sevastyanov, O. L. Tashlykov // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2174, Iss. 1. – P. 020170.
7. Шумков Д. Е. Повышение надежности охлаждения облученных топливных сборок в шахте-хранилище исследовательского реактора ИВВ–2М / Д. Е. Шумков, С. С. Мингалимов, О. Л. Ташлыков // Инновации в атомной энергетике : сб. докл. конф. молодых специалистов. – Москва, 2019. – С. 705–711.
8. Пучков В. Н. Термосифонные системы пассивного теплоотвода при длительном обесточивании ВВЭР / В. Н. Пучков // ProAtom : информ. агентство. – URL: http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=-article&sid=4216 (дата обращения: 06.07.2020).
9. Shumkov D. E. Development of a passive removal heat system for the storage pit of IVV-2M research nuclear reactor / D. E. Shumkov, O. L. Tashlykov // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2313, Iss. 1. – P. 070005.

УДК 621.396

Жихарев А.М., Ищенко Е.А., Фёдоров С.М., Кузнецова В.В.

ДВУХДИАПАЗОННАЯ ЩЕЛЕВАЯ MIMO АНТЕННА ДЛЯ СОТОВОГО ТЕЛЕФОНА

Аннотация. В статье рассматривается двухдиапазонная MIMO антенная решетка для сетей 4 и 5 поколений (sub-6 GHz). Для предложенной конструкции определены основные характеристики антенного элемента, произведены измерения реальной конструкции. Для MIMO антенной решетки определен коэффициент корреляции огибающей, коэффициент удельного поглощения, показавший безопасность применения конструкции для человека. Предложенная конструкция антенны может быть установлена на мобильное устройство для работы в режиме MIMO 4x4.

Ключевые слова: MIMO антенная решетка, 5G, 4G.

Abstract. The article discusses a dual-band MIMO antenna array for networks of 4 and 5 generations (up to 6 GHz). For the proposed design, the main characteristics of the antenna element, measurements of the real design were made. For the MIMO antenna array, the envelope correlation coefficient, the specific gravity coefficient, showing the safety of using a human structure is determined. The proposed antenna design can be installed on a mobile device to operate in 4x4 MIMO mode.

Keywords: MIMO antenna array, 5G, 4G.

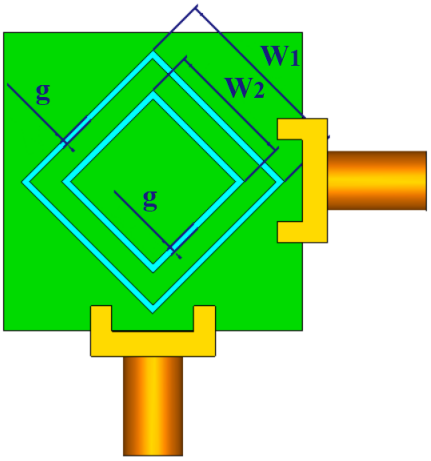
Введение

Развитие современных технологий сотовой связи позволяет улучшить качество получения информации из сети интернет. Сети пятого поколения (5G) способны обеспечить высокоскоростной доступ в интернет с малой задержкой при получении данных. Одной из самых главных технологий, которая позволяет достичь требуемых показателей выступает MIMO. Объектом исследования является MIMO антенная решетка, представляющая собой конструкцию, состоящую из четырех центральных антенных элементов и восьми микрополосковых линий питания.

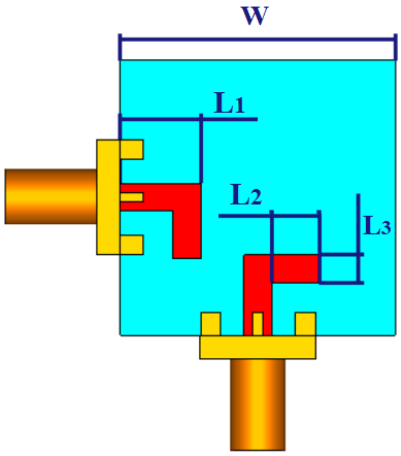
Целью данной работы является разработка многоканальной MIMO-антенны LTE и 5G с дальнейшим исследованием её влияния на пользователя.

Конструкция антенны

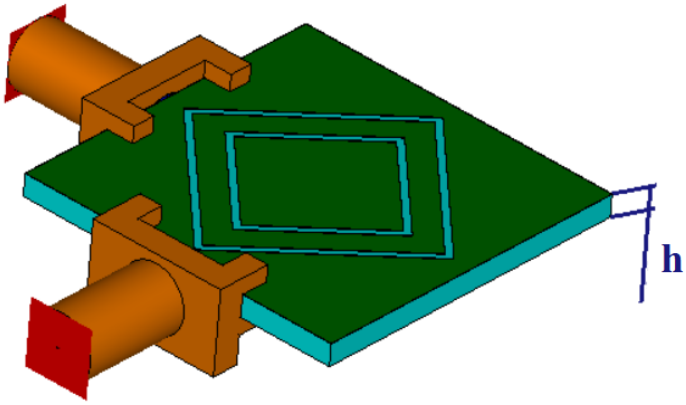
Антенна представляет собой двухэлементный щелевой ромбовидный резонатор, построенный по печатной технологии (материал диэлектрика – Fr-4). Конструкция антенны приводится на рис. 1.



а)



б)



в)

Рисунок 1 – Конструкция антенны

Геометрические параметры приводятся в табл. 1.

Таблица 1 – Значения параметров конструкции антенного излучателя

Параметр	Значение (мм)
W	24
W_1	15
W_2	10.5
g	0.5
L_1	7
L_2	4.2
L_3	2.4
h	1.5

Резонансные частоты антенны в основном определяются длиной окружности используемых ромбовидных прорезей.

Первый резонанс (при 2.6 ГГц) зависит от окружности внешнего ромбовидного кольца.

Второй резонанс (при 3.6 ГГц) зависит от окружности внутреннего ромбовидного кольца. Таким образом, длина окружности паза кольца должна удовлетворять диэлектрической длине волны в соответствующей частотной точке:

$$W_1/2 + g = \lambda_1 \quad (1)$$

$$W_2/2 + g = \lambda_2 \quad (2)$$

Применение конструкции с двумя ромбовидными резонаторами позволяет достичь двух рабочих диапазонов, что показывает график Возвратных потерь (рис. 2).

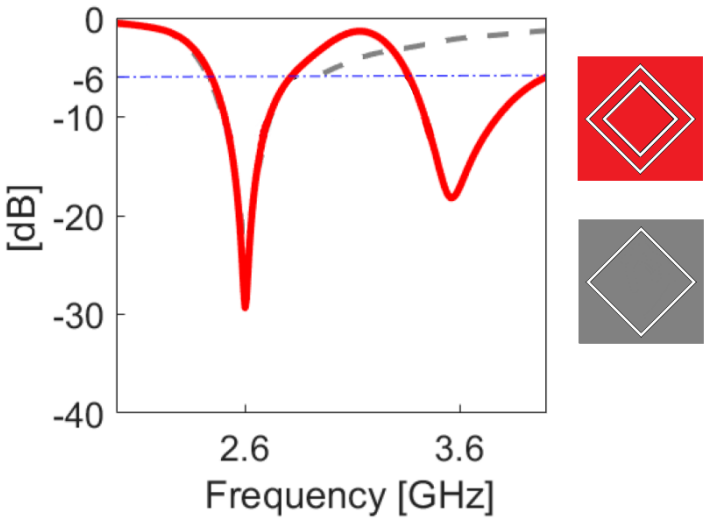


Рисунок 2 – Возвратные потери при использовании двух резонаторов (сплошная линия) и одного (пунктирная линия)

Полученные результаты моделирования для одного антенного элемента приводятся на рис. 3.

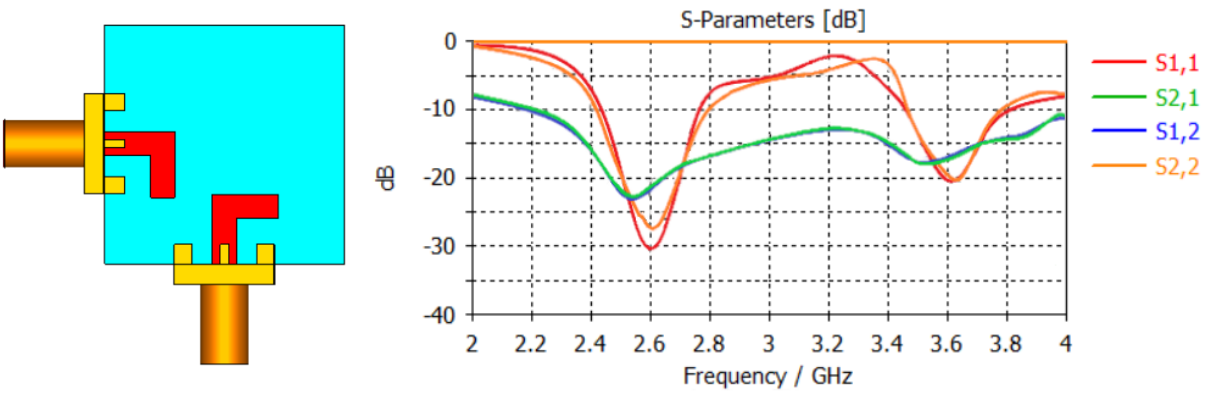
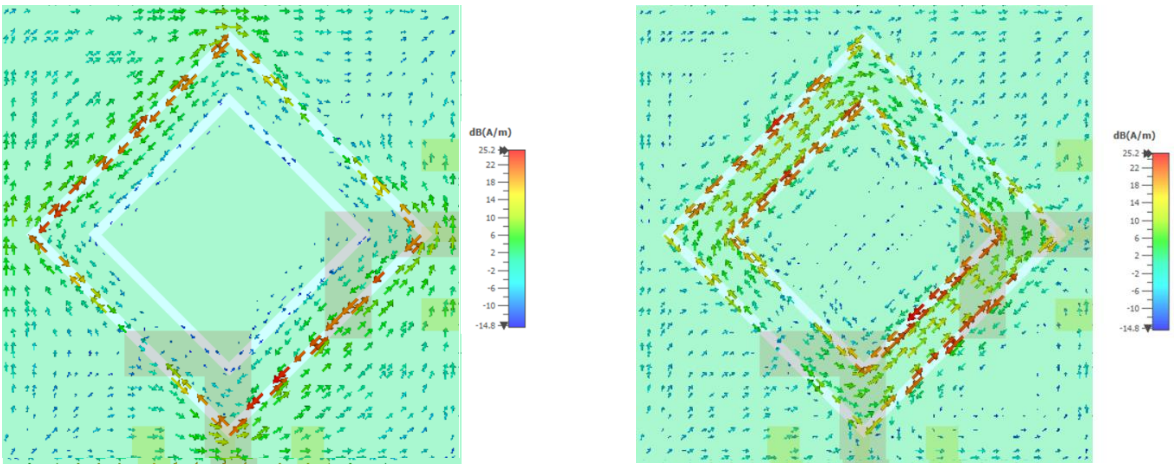


Рисунок 3 – График S-параметров для антенного элемента

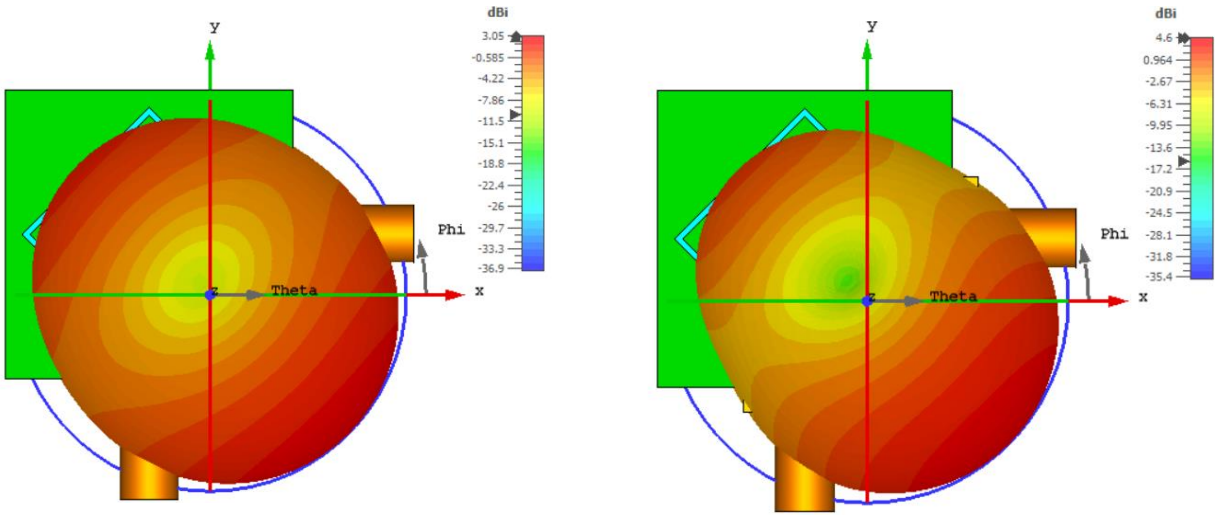
Так как по полученным результатам отчетливо видны 2 частотных резонанса (2.6 ГГц и 3.6 ГГц) построим картины поверхностных токов – рис. 4.



а) б)

Рисунок 4 – Распределение тока при а) 2.6 ГГц, б) 3.6 ГГц

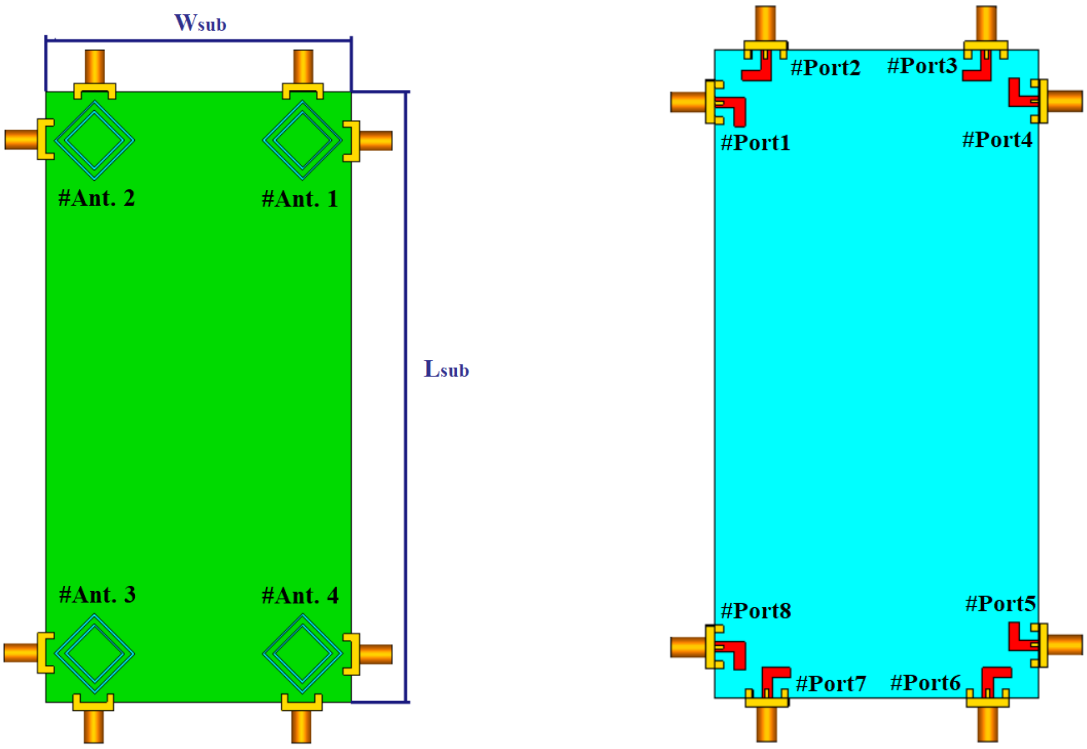
Так как разрабатываемая антенна предназначена для установки в телефон, она должна обладать всесторонней диаграммой направленности, что позволяет обеспечить плавное подключение к базовым станциям. Картина диаграмм направленности приводятся на рис. 5.



а) б)

Рисунок 5 – Трехмерные изображения диаграмм направленности излучателя: а) 2.6 ГГц; б) 3.6 ГГц

Для реализации MIMO антенной решетки предлагается установить 4 антенных элемента по углам корпуса устройства (рис. 6), причем расстояния между антенными элементами: W_{sub}=75 мм; L_{sub}=150 мм.



а) б)

Рисунок 6 – Конфигурация MIMO антенных решеток

Важнейшим параметром MIMO антенной решетки выступают коэффициенты корреляции огибающей:

$$ECC = \frac{|S_{mm}^{*}S_{nm}+S_{mn}^{*}S_{nn}|^{2}}{(1-|S_{mm}|^{2}-|S_{mn}|^{2})(1-|S_{nm}|^{2}-|S_{nn}|^{2})^{*}} \quad (3)$$

На основе полученной конструкции был получен график коэффициентов корреляции (рис. 7).

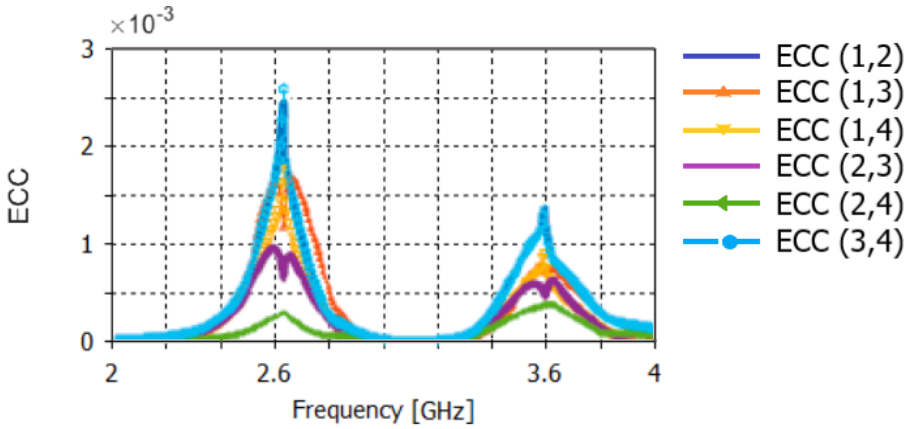
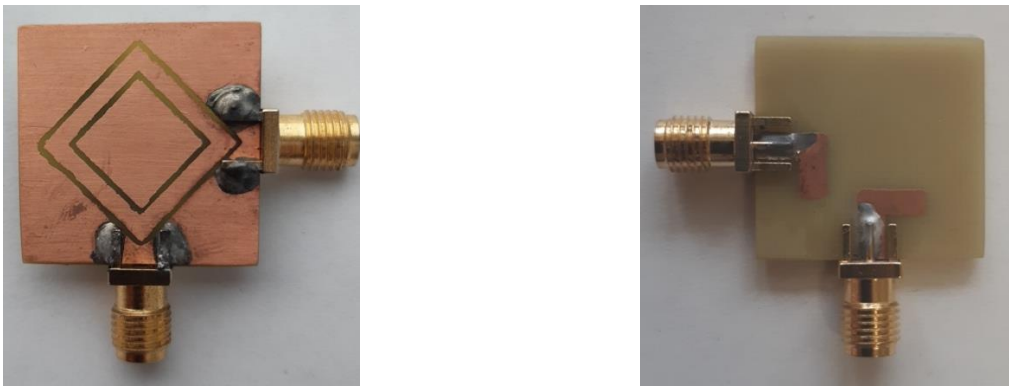


Рисунок 7 – Смоделированный коэффициент корреляции огибающей (ECC)

Как видно по полученным результатам корреляция мала, что соответствует требованиям стабильной работы MIMO антенной решетки.

Измерение параметров реальной антенны

Для сравнения характеристик антенны при моделировании и реальном исполнении была разработана модель антенны (рис. 8).



а) б)

Рисунок 8 – Изготовленная антенна-излучатель а) вид сверху и б) вид снизу

Результаты моделирования и измерения обратных потерь антенны-излучателя показаны на рис. 9. Как видно, при ширине полосы импеданса – 10 дБ антенна может покрывать полосы частот 2.5 – 2.7 ГГц и 3.45 – 3.8 ГГц с лучшими потерями по сравнению с − 18 дБ во всех полосах. Кроме того, получено хорошее соответствие между моделированием и измерением. Незначительные расхождения экспериментальных результатов связаны с тем, что диэлектрик FR-4 обладает высокими потерями, так же стоит учитывать погрешность при вытравливании печатной платы и погрешность при монтаже прототипа.

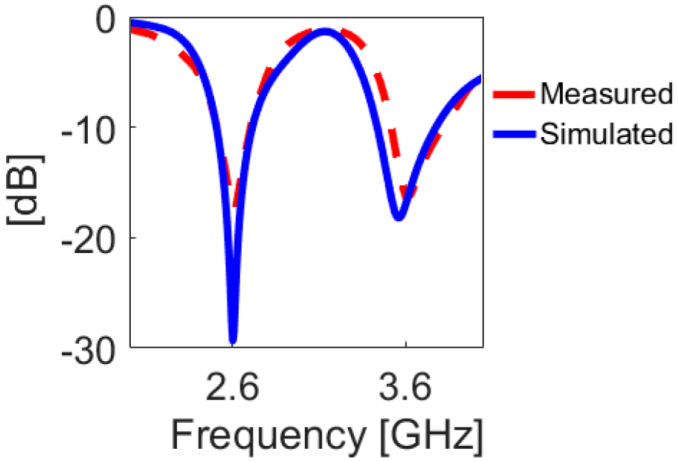


Рисунок 9 – График измеренных (красная линия) и смоделированных (синяя линия) обратных потерь двухэлементного ромбовидного щелевого излучателя

Исследование SAR для разработанной конструкции

В этом разделе выполняется моделирование характеристики удельной скорости поглощения (SAR). Рис. 10 и 11 иллюстрируют смоделированную характеристику SAR вблизи человеческой головы для разных резонансных частот. Печатная плата смартфона расположена на расстоянии менее 10 мм от головы пользователя.

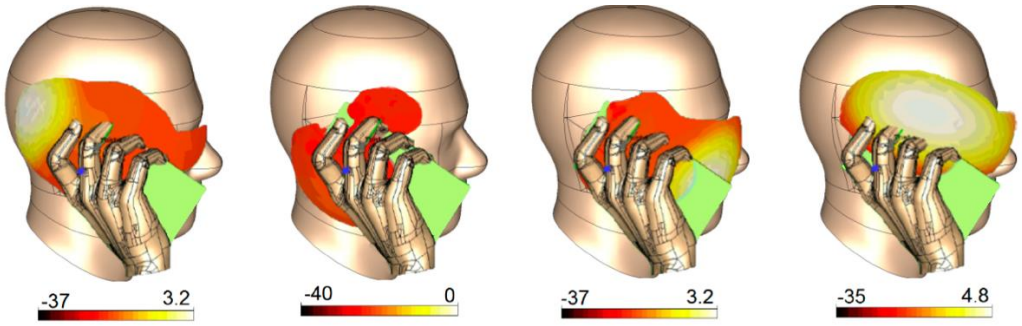


Рисунок 10 – Смоделированная удельная скорость поглощения (SAR) для каждого антенного элемента при 2.6 ГГц

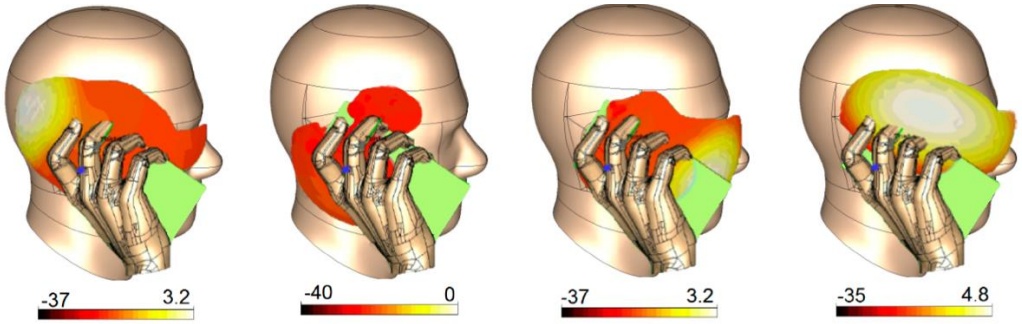


Рисунок 11 – Смоделированная удельная скорость поглощения (SAR) для каждого антенного элемента при 3.6 ГГц

Как показано, антенна имеет низкие значения SAR на 2.6 ГГц и 3.6 ГГц, что соответствует безопасному применению предложенной конструкции антенны для пользователя.

Заключение

В ходе выполнения работы была разработана многодиапазонная восьмипортовая антенна MIMO для смартфонов будущего поколения, охватывающая два спектральных диапазона. Антенна подходит для 4G и 5G. Для достижения двухполосности в углы печатной платы смартфона интегрированы двухэлементные ромбовидные щелевые излучатели с технологией подачи микрополосковых линий. Ширина полосы импеданса каждого излучателя составляет от 2.6 до 2.7 ГГц и от 3.45 до 3.8 ГГц, охватывающих резонансные

частоты 2.6 ГГц и 3.6 ГГц соответственно. Все параметры удовлетворяют требованиям стандарта SAR.

Библиографический список

1. Eight-port orthogonal dual-polarized antenna array for 5G smartphone applications / M.-Ya. Li, Z. Xu, Y.-L. Ban, C.-y.-D. Sim. – DOI 10.1049/iet-map.2017.0230 // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2016. – Vol. 64, Iss. 9. – P. 3820–3830.
2. Low SAR phased array antenna for mobile phones / J. Moustafa, N. J. McEwan, R. Abd-Alhameed, P. Excell // Applied Computational Electromagnetics Society Journal. – 2006. – Vol. 21, Iss. 3. – P. 196–205.
3. Sharawi M. S. Printed multiband MIMO antenna systems and their performance metrics [wireless angle] / M. S. Sharawi // IEEE antenna propagation. – 2013. – Vol. 55, Iss. 5. – P. 218–232.
4. Cheng Y. New dual-band microstrip antenna with circular polarization and concentric annular slot / Y. Cheng, H. Liu // International Journal of Antennas and Propagation. – 2018. – Vol. 2018. – P. 8.
5. Pal A. Multi-frequency microstrip antenna design using multiple rings / A. Pal, S. Behera, K. J. Vinoy // IET Microwaves, Antennas & Propagation. – 2009. – Vol. 3, Iss. 1. – P. 77–84.

УДК 621.039:006.354

Хейнштейн В.Я., Никифоров С.В., Фатина Ж.Е.

РАЗРАБОТКА ТИПОВОГО СВИДЕТЕЛЬСТВА НА АТТЕСТОВАННЫЕ ОБЪЕКТЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ОБЛАСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

Аннотация. В статье описывается необходимость разработки свидетельства на аттестованный объект. Также предложены основные пункты, из которых должно состоять свидетельство, обоснован их выбор, приведен пример бланка свидетельства.

Ключевые слова: обеспечение единства измерений, аттестованный объект, стандартный образец, метрологическое обеспечение, аттестованные вещества, свидетельство об аттестации.

Abstract. The article describes the need to develop a certificate for a certified object. The main points of which the certificate should consist are proposed in the article, their choice is justified, and an example of a certificate form is given.

Keywords: ensuring the uniformity of measurements, certified object, standard sample, metrological support, certified substances, certificate of certification.

Обеспечение безопасности продукции и производств в области использования атомной энергии является одним из приоритетных направлений работы Белоярской атомной электростанции. Одним из факторов, определяющих безопасность продукции, является ее качество. В условиях повышенной опасности особое значение приобретает обеспечение единства измерений и требуемой точности. Единство измерений – состояние измерений, при котором их результаты выражены в допущенных к применению в Российской Федерации единицах величин, а показатели точности измерений не выходят за установленные границы [1].

Стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов являются одним из элементов обеспечения единства измерений. Они по своему назначению выполняют роль мер и используются для градуировки, поверки средств измерений и контроля правильности результатов измерений. Однако в метрологической практике помимо стандартных образцов применяются объекты, не являющиеся ими. Для тех характеристик, которые нестабильны и/или очень редкие, нельзя создать стандартный образец, так как отсутствует возможность получить приемлемую погрешность или достаточное для испытаний количество материала и/или обеспечить его стабильность. В этих случаях используются аттестованные объекты. Аттестованными объектами называются те объекты, для которых установлены значения одной или более величин, характеризующих состав, структуру, свойства или образы (файлы) реальных объектов измерений [2].

Данный термин впервые был введен Приказом Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» № 1/10-НПА [2]. Примером аттестованного объекта может служить изображение зерненой структуры таблеток ядерного керамического топлива, использующееся для установления характеристики размера зерна и являющееся носителем свойств реального объекта. Данный объект выполняет функцию стандартного образца, но не является им, так как файл, содержащий изображение структуры, нематериален. Также примерами аттестованных объектов являются имитаторы изделий. Имитаторы изделий – изделия, свойства которых оказывают на результаты измерений влияние, аналогичное влиянию реальных объектов измерений, но отличающиеся от них составом и свойствами [3]. Металлические цилиндрические образцы будут являться имитаторами плотности таблеток ядерного керамического топлива, если будут соответствовать размерам таблеток и состав их сплава будет иметь коэффициент поглощения гамма-излучения близкий к коэффициенту поглощения диоксида урана. В отличие от стандартных образцов, имитаторы практически не изнашиваются и более просты в изготовлении, как следствие, случайная погрешность при градуировке установки минимальна.

Из-за недавнего введения такого понятия, как «аттестованный объект», появилась проблема с оформлением необходимого пакета документов для его использования. В настоящий момент в филиале АО «Росэнергоатом» «Белоярская АЭС» отсутствует единая форма свидетельства на аттестованный объект. В связи с этим целью настоящей работы является разработка типового свидетельства на аттестованные объекты, применяемые на Белоярской атомной электростанции.

Свидетельством называется документ, официально подтверждающий какой-либо факт. В нашем случае, свидетельство должно доказывать соответствие объекта необходимым требованиям для его безопасного использования при проведении работ на объектах атомной отрасли. В ходе выполнения исследования, нами были изучены и проанализированы нормативные документы, касающиеся аттестованных объектов и, схожих с ними, стандартных образцов, а также выбраны восемь основных пунктов, дающих полную характеристику объектам.

Изучив нормативную документацию, был сделан вывод о том, что необходимым пунктом в свидетельстве на аттестованный объект является упоминание организации, разработавшей аттестованный объект. Организацией-разработчиком является организация или отдел, занимающийся научно-техническими разработками и изготовлением аттестованного объекта и несущий ответственность за разработанную им техническую документацию на разработку, изготовление и эксплуатацию объекта. Следовательно, при возникновении каких-либо вопросов по вышеупомянутым пунктам следует обращаться в организацию,

разработавшую аттестованных объект, а значит, информация о ней должна быть упомянута в свидетельстве.

В научных источниках выделяют одиннадцать видов аттестованных объектов [4]. Нами было замечено, что на сегодняшний момент существуют и находятся в разработке шесть основных видов аттестованных объектов. На сегодняшний день самыми многочисленными являются аттестованные смеси и образцы для контроля качества результатов испытаний. Аттестованными смесями называют смеси двух и более веществ, приготовленные по документированной методике, с установленными по результатам аттестации по расчетно-экспериментальной процедуре приготовления значениями величин, которые характеризуют состав смеси [5].Образцы для контроля качества результатов испытаний – это те образцы, для которых устанавливаются ожидаемые результаты их испытаний и соответствующие характеристики погрешности, применяемые для контроля правильности воспроизведения режима испытаний. Такими образцами при механических испытаниях будут являться образцы изделий, для которых установлены ожидаемые значения предела текучести и т.д. Следующими немаловажными видами аттестованных объектов являются аттестованные вещества, материалы, изделия и имитаторы изделий. Свойства всех этих объектов оказывают аналогичное влияние на результаты измерений, как и реальные объекты измерений. Однако имитаторы изделий отличаются от реальных объектов составом и свойствами, в отличие от аттестованных веществ, материалов и изделий. Радиационные источники, а именно, комплексы, установки, аппараты, оборудования и изделия, не относящиеся к ядерным установкам, но содержащие радиоактивные вещества или генерирующие ионизирующее излучение, также являются аттестованными объектами. К этому виду аттестованных объектов относятся пробы, приготовленные по установленной технологии на основе образцовых радиоактивных растворов из вещества контролируемой среды. Не менее важным видом аттестованных объектов, являются образы объектов. Образами называются нематериальные объекты, являющиеся носителями информации о свойствах реальных объектов. Чаще всего это информационные файлы, изображения. Характеристики устанавливаются путем экспертных оценок, получаемых экспертами высшей квалификации. Комплекты аттестованных объектов нельзя назвать видом или подвидом, однако их выделяют в отдельную группу. Это совокупность аттестованных объектов, изготовленных по единой технологии и отличающихся только значениями аттестованных характеристик. Они имеют свою особенность в применении. Комплекты чаще всего используются для построения градуировочных характеристик, но единичные экземпляры, входящие в комплект, могут использоваться отдельно.

Каждый из видов аттестованных объектов делится на подвиды и типы. Тип определяет общие признаки ряда предметов, на основе их сходства или подобия, в отличие от вида, который охватывает большее количество аттестованных объектов, часто имеющих разные аттестованные и метрологические характеристики. Поэтому нами было принято решение об обязательном включении в свидетельство об аттестации именно такого пункта, как «тип аттестованного объекта».

Наименование объекта – это его характеристика, которая отражает индивидуальность и основные особенности. Мы предлагаем в наименовании аттестованных объектов указывать наименование материала, вещества или изделия, а также наименование аттестуемой характеристики. Используя именно такое обозначение, уменьшается ошибка выбора неподходящего объекта. Примером грамотного наименования является «аттестованный объект (АО) содержания железа в сплаве циркония Э-635». Здесь упомянуты: материал – сплав циркония Э-635 и аттестуемая характеристика – содержание железа в сплаве.

По нашему мнению, неотъемлемой частью свидетельства на АО, является назначение объекта. Благодаря введению данного пункта, пользователю будет предоставлена краткая информация о функционале выбранного им объекта и отражено его предназначение. Например, назначением аттестованного объекта файлов изображений зерненой структуры таблеток ядерного керамического топлива является установление характеристики размера зерна.

Аттестация аттестованного объекта – исследование аттестуемого объекта в целях установления метрологических характеристик [4]. Исходя из вышеупомянутого определения, аттестованной характеристикой будет являться наименование используемой метрологической характеристики. Для каждого вида аттестованных объектов существует свои аттестуемые характеристики. Например, для аттестованных объектов в виде имитаторов изделий аттестуемая характеристика – величина, характеризующая имитируемые свойства объектов измерений. Величина, характеризующая ожидаемые результаты испытаний будет являться аттестуемой характеристикой для аттестованных объектов контроля качества результатов испытаний.

Мы считаем, одного названия аттестованной характеристики в свидетельстве об аттестации будет недостаточно. Численное значение метрологической характеристики выступает в качестве аттестованного значения с границами его погрешности и с указанием доверительной вероятности. Существует несколько способов оценивания аттестованного значения и погрешности аттестованного объекта. Именно они будут являться методами аттестации. Нами было замечено, что чаще всего способы оценивания зависят от вида аттестованного объекта и условий применимости способа. Для аттестации

аттестованных объектов особо чистых веществ используется способ с использованием методики выполнения измерений с установленными или устанавливаемыми в процессе применения метрологическими характеристиками методом «100-Х». При этом проводят измерения не основного вещества, а содержания примесей и суммы примесей в основном веществе. Способ контролируемого изготовления обеспечивает получение метрологических характеристик в заданных диапазонах. Смысл контролируемого изготовления заключается в том, что при выполнении всех процедур в точном соответствии с методикой изготовления будет обеспечено достижение всех значений метрологических характеристик аттестованного объекта в границах, установленных в методике. При аттестация аттестованных объектов способом образцов-свидетелей значение аттестуемой характеристики измеряют не для объекта, подлежащего аттестации, а для других объектов – образцов свидетелей. Далее аттестуемый объект и образцы-свидетели сопоставляют с помощью другого метода – неразрушающей методики сравнения. Такой способ применяют при создании неделимых аттестованных объектов в случаях, когда для исследования их метрологических характеристик не могут быть применены разрушающие методы. Метод экспертных оценок применяется тогда, когда для оценки аттестованного значения и его характеристик погрешности невозможно применить ни один из изученных методов. В качестве аттестованного значения принимается среднее арифметическое результатов, полученных по рекомендациям экспертов, а в качестве погрешности аттестованного значения – половина размаха этих результатов. Чаще всего такой метод оценивания применяется для образов объектов [6]. Способы оценивания аттестованного значения и погрешности аттестованного объекта никак не влияют на его применение, поэтому было принято решение не включать данный пункт в свидетельство об аттестации.

Проанализировав нормативную документацию, мы отнесли к классификационным признакам аттестованных объектов способы оценивания однородности и стабильности аттестованных объектов [4]. Характеристика однородности может оказывать существенное влияние на характеристику погрешности. Поэтому в этих случаях необходимо производить ее оценку и упоминать в свидетельстве об аттестации. В тех случаях, когда данная характеристика не устанавливается ввиду обеспечения однородности технологией изготовления или является незначимой, то мы считаем, что ее значение в свидетельстве упоминать не стоит. Чаще всего стабильность материала оценивается в процессе применения в области неразрушающего контроля. Для дисперсных аттестованных объектов характеристику погрешности однородности материала оценивают способом, основанным на многократных измерениях

содержания аттестуемого компонента или свойства в нескольких пробах, отобранных случайным образом от всего материала, с последующей обработкой результатов по схеме однофакторного дисперсионного анализа. Для монолитных аттестованных объектов обработка результатов происходит по схеме двухфакторного дисперсионного анализа.

Изучая уже существующие аттестованные объекты, нами было обнаружено, что большинство из них обладают кроме аттестованных характеристик еще и другими характеристиками, которые влияют на условия их использования. Мы предлагаем отнести эти характеристики к «дополнительным» и также упомянуть их в свидетельстве для возможности корректного применения АО. В случаях, когда применение объектов не связано с какими-либо ограничениями, дополнительные сведения возможно не приводить. Например, для дисперсных аттестованных объектов необходимо приводить такую дополнительную характеристику, как минимальная масса навески. В методиках радиационного контроля и некоторых методиках неразрушающего анализа ядерных реакторов важной дополнительной характеристикой является геометрия взаимного расположения источника и детектора, что является еще одним примером необходимости введения данного пункта. Необходимость использования специальных дополнительных приспособлений также является важным примечанием при применении аттестованных объектов.

Немаловажным пунктом свидетельства об аттестации является «Условия хранения и транспортирования». Требования к транспортировке и хранению формируются еще на этапе разработки аттестованного объекта. Важность данной информации обусловлена возможной потерей качеств и свойств перевозимого груза. В зависимости от состава, материала изделия или вещества условия будут отличаться. Мы считаем, что необходимо упоминать такие условия содержания аттестованных объектов, как температура, влажность, давление и освещенность. Для некоторых экземпляров аттестованных объектов могут быть добавлены: хранение во временной антикоррозионной защите, в щелочной среде и т.д. Требования к транспортировке должны указывать, каким видом транспорта возможна перевозка груза и при каких условиях в этот момент должен храниться груз. При необходимости более подробного и обширного изложения необходимых требований, рекомендуем прикреплять данную информацию в качестве приложения к свидетельству об аттестации или подробно прописывать данный пункт в инструкции по применению аттестованных объектов.

Как известно, срок действия аттестованного объекта также устанавливается на этапе его разработки. По истечении указанного срока они должны быть изъяты из применения потребителем вне зависимости, использовались они или нет. Далее возможна повторная аттестация аттестованных объектов. Основным условием

получения положительного результата при повторной аттестации является незначительное изменение аттестованных значений. Если при повторной аттестации разность между аттестованным значением и значением, полученным при повторной аттестации, не превышает трети от прежде установленного значения, то срок действия аттестованного объекта продлевается. Мы считаем, сто данный пункт должен упоминаться в свидетельстве об аттестации для наглядного представления срока действия используемого объекта.

Изучив всю необходимую информацию об аттестованных объектах и проанализировав важность внесения ее в официальный документ, нами были выбраны восемь основных пунктов, дающих полную характеристику объекту и сформировано типовое свидетельство на аттестованный объект, изображенное на Рисунке 1.

_____

организация-разработчик _____

СВИДЕТЕЛЬСТВО НА АТТЕСТОВАННЫЙ(НЫЕ) ОБЪЕКТ(ТЫ)

Тип АО_____ Наименование АО_____
регистрационный номер

1 Назначение_____

2 Аттестуемая характеристика:_____
наименование

аттестованное значение_____
абсолютная (или относительная) погрешность _____ при доверительной вероятности _____

3 Дополнительные характеристики:_
- характеристика однородности(при необходимости);
-характеристика стабильности (при необходимости)._____

4 Документы, определяющие порядок и условия применения АО:
_____

5 Условия хранения и транспортирования:_____

6 Срок действия:_____ (с последующей повторной аттестацией в ___ г.)

7Дата регистрации:_____

Директор _____ / _____/
(предприятия-разработчика) подпись Ф.И.О.
М.п.

Аттестованный объект утвержден ГНМЦ и внесен в специальный раздел Федерального информационного Фонда

Главный метролог _____ / _____/
ГНМЦ подпись Ф.И.О.
М.п.

Рисунок 1 – Типовая форма свидетельства на аттестованный объект

Разработанное типовое свидетельство на аттестованный объект позволило стандартизовать всю необходимую информацию для последующего корректного использования продукта и определило рамки ответственности участников. Также типовая форма вошла в состав пакета документов, необходимого при использовании аттестованных объектов и была предложена другим метрологическим отделам подразделений «Концерн Росэнергоатом» для внедрения.

Библиографический список

1. Об обеспечении единства измерений : Федер. закон № 102-ФЗ : принят Гос. Думой 11 июня 2008 г. : одобрен Советом Федерации 18 июня 2008 г. – Москва : Проспект ; Санкт-Петербург : Кодекс, 2017. – 19 с.
2. Метрологические требования к измерениям, эталонам единиц величин, стандартным образцам, средствам измерений, их составным частям и программному обеспечению, методикам (методам) измерений, применяемым в области использования атомной энергии : приказ Госкорпорации «Росатом» № 1/10-НПА : принят 31 окт. 2013 г. : утв. 15 марта 2018 г. – Москва : Росатом, 2013. – 17 с.
3. ГОСТ Р 8.565–2014. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение атомных станций. Основные положения : принят Приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 7 нояб. 2014 г. № 1490–ст : дата введ. 2015–07–01. – Москва : Стандартинформ, 2019. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200114170 (дата обращения: 17.08.2020).
4. РМГ 60–2003. Государственная система обеспечения единства измерений. Смеси аттестованные. Общие требования к разработке : приняты Межгос. советом по стандартизации, метрологии и сертификации : протокол № 23 от 22 мая 2003 г. : дата введ. 2004–07–01. – Москва : Стандартинформ, 2007. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200035379 (дата обращения: 17.09.2020).
5. Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». Классификация аттестованных объектов, алгоритмы их аттестации : утв. Гос. корпорацией по атомной энергии «Росатом» 21 дек. 2015 г. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 78 с.
6. ГОСТ Р 8.563–2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики (методы) измерений : принят Приказом Федер. агенства по техн. регулированию и метрологии от 15 дек. 2009 г. № 1253–ст : дата введ. 2010–04–15. – Москва : Стандартинформ, 2015. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200077909 (дата обращения: 17.09.2020).

УДК 669.1.017

Кривенок Д.А., Данилов С.В., Никульченков Н.Н., Лобанов М.Л.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Аннотация. Проведено моделирование кристаллографической текстуры контролируемой термомеханической обработки низкоуглеродистой высокопрочной стали. Текстура возникает в результате горячей прокатки аустенита и последующего полиморфного превращения в соответствие с ориентационными соотношениями между исходной и образующейся фазами. Из возможных ориентаций феррита были выбраны ориентации, возникающие на аустенитных границах решетки совпадающих узлов ∑3.

Ключевые слова: кристаллографическая текстура, контролируемая термомеханическая обработка, ориентировки кристаллической решетки, сдвиговое превращение

Abstract. Crystallographic texture simulation of thermo-mechanical controlled processing for low-carbon higher strength steel was conducted. The texture arises as a result of austenite hot rolling with subsequent polymorphic transformation following the orientation relationships between the initial and formed phases. The orientations were chosen from possible options as ferrite orientations that arise on austenitic ∑3 boundaries of coincidence site lattice.

Keywords: crystallographic texture, thermo-mechanical controlled processing, crystal lattice orientations, shear transformation

Введение

Формированию объемной кристаллографической текстуры предшествуют направленные деформационные и термические воздействия при производстве металлических полуфабрикатов и функциональных изделий. Наличие текстуры позволяет определять уровень ориентационно-зависимых физико-механических свойств изделия, а также оптимизировать известные и разрабатывать новые технологии, управляя ее возникновением и развитием [1-3]. В формирование объемной текстуры материала заложено сочетание результатов процессов, протекающих на субмикроуровне таких, как дислокационные сдвиги при деформациях, перемещения межкристаллитных и межфазных границ при трансформациях кристаллической решетки [4].

Для того, чтобы повысить экономическую эффективность магистральных трубопроводов, применяют низкоуглеродистые экономнолегированные высокопрочные стали, способные работать в сложных климатических условиях при повышенном рабочем давлении [5, 6]. Применение труб из высокопрочного материала позволяет существенно снизить их металлоемкость [5-7]. Переходу низколегированных трубных сталей от классов прочности X52–X65 к X70–X80 и выше к X100 способствовала разработка и внедрение в промышленное

производство Thermo-mechanical Controlled Processing (TMCP), суть которой заключается в контролируемой прокатке в аустенитной области и последующем ускоренном контролируемом охлаждении, в процессе которого реализуется сдвиговое γ→α-превращение. Внедрение TMCP позволило осуществить переход от феррито-перлитных структур к продуктам сдвигового превращения – преимущественно бейнита, и, соответственно, получить более высокие классы прочности. Образование бейнита обеспечивается контролем устойчивости переохлажденного аустенита за счет специального легирования и применением ускоренного, управляемого охлаждения [5-12].

Наличие и выраженность кристаллографической текстуры оказывается ответственной за трещиностойкость изделий [13, 14]. Важно отметить, что ориентации зерен, возникающие при фазовых превращениях в соответствии с ориентационными соотношениями (ОС), Курдюмова-Закса (К-З), Нишиямы-Вассермана и др. являются многовариантными. То есть возникновение всех возможных ориентировок феррита в одном исходном аустенитном зерне должно приводить к возникновению практически бестекстурного состояния. При этом все современные исследования указывают на формирование выраженной текстуры в малоуглеродистых низколегированных сталях в результате TMCP, влияющей на разрушение готовых изделий [13-17].

Появление ограниченного числа ориентировок в результате сдвигового γ→α-превращения, в материале с исходно сложной многокомпонентной текстурой, предполагает наличие неких структурных факторов, существенно ограничивающих возникновение всех возможных ориентаций кристаллитов при фазовой перекристаллизации. При этом следует учитывать два важных «энергетических» момента. Во-первых, трехмерная растущая область новой фазы или нового зерна в качестве зародыша должна иметь как минимум двухмерный объект, то есть некую достаточно протяженную поверхность. Во-вторых, при перестройки кристаллической решетки переориентации при рекристаллизации или трансформации при фазовом превращении, новая и исходная фазы должны содержать некий общий, кристаллографически практически одинаковый для обоих составляющих процесса элемент [18, 19].

Учет данных моментов приводят к выводу о том, что местами зарождения новых зерен или новых фаз являются межзеренные кристаллографически упорядоченные границы или, возможно, протяженные дефекты упаковки. В работах [20, 21] на примере стали Х18Н9 было показано, что кристаллиты с ОЦК решеткой занимают две соседние области перекристаллизации в γ-фазе. Первые зародыши γ→α-превращения возникают не внутри аустенитного зерна, а в соседних зернах, разделенных границей решетки совпадающих узлов (РСУ) Σ3. В результате образуются зерна феррита, связанные двойниковой разориентацией

или близкой к ней. Таким образом, отношение ориентации текстурных компонентов исходного материала и структуры, полученной термической обработкой, может быть объяснено в терминах начала фазовых превращений (как сдвиговых, так и диффузионно-контролируемых) на кристаллографически упорядоченных границах, включая специальные границы, аналогичными РСУ-границам Σ3 и Σ11 [14, 16, 22].

Целью данной работы является моделирование кристаллографической текстуры низкоуглеродистой высокопрочной стали, формирующейся при ТМСР, с учетом возможности зарождения зерен новой фазы на РСУ-границах Σ3.

Образцы и методика эксперимента

При моделировании предполагалось, что сдвиговое γ→α′(α)-превращение реализуется в соответствии с ориентационными соотношениями близкими к ОС К-З {111}γ‖{101}α, <110>γ‖<111>α. Поскольку в ГЦК решетке γ имеется четыре кристаллографические эквивалентные плоскости типа (111), (1-11), (1-11),(11-1) и шесть кристаллографических эквивалентных направлений <110>, то относительно одного положения кристалла γ, при отсутствии ограничений на места зарождения новой фазы, возможны 24 ориентации кристаллов α, удовлетворяющих ОС соотношению К-З. Соответственно, в результате превращения и отсутствия ограничений на места зарождения новой фазы из одной ориентировки аустенита может возникать 24 ориентировки феррита.

Изменение кристаллографической ориентации при фазовом превращении задавалось матричным уравнением: $M = T \cdot A$, где M и A – матрицы ориентации, состоящие из трех ортогональных единичных векторов, показывающих кристаллографическую ориентацию фаз аустенита и мартенсита (бейнита, феррита), соответственно, а T – матрица преобразования ориентации [23]:

$$T = \begin{pmatrix} 0{,}742 & -0{,}667 & -0{,}075 \\ 0{,}650 & 0{,}742 & -0{,}167 \\ 0{,}167 & 0{,}075 & 0{,}983 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

Для получения индексов Миллера направлений и плоскостей ориентировок α-фазы, после превращения, элементы матрицы перемножаются с индексами заданной ориентации и складываются между собой, а именно:

$$\mathrm{H} = \mathrm{h} \cdot \mathrm{a}_{11} + \mathrm{k} \cdot \mathrm{a}_{12} + l \cdot \mathrm{a}_{13}, \quad (2)$$

$$\mathrm{K} = \mathrm{h} \cdot \mathrm{a}_{21} + \mathrm{k} \cdot \mathrm{a}_{22} + l \cdot \mathrm{a}_{23}, \quad (3)$$

$$\mathrm{L} = \mathrm{h} \cdot \mathrm{a}_{31} + \mathrm{k} \cdot \mathrm{a}_{32} + l \cdot \mathrm{a}_{33}, \quad (4)$$

где (HKL) – искомые индексы плоскости ОЦК решетки, (hkl) – заданные индексы плоскости ГЦК решетки, a_{nm} – элемент матрицы, n – порядок строки, m – столбца.

По аналогичным формулам производится расчет индексов направления [UVW], подставляя вместо h, k, l заданные индексы направления – u, v, w.

Возможные ориентации α-фазы для любой ориентировки γ-фазы вычислялись с использованием программы MS Excel (таблица 1).

В качестве исходных ориентировок аустенита выбирались стабильные деформационные ориентировки ГЦК решетки согласно работе [24]. Предполагалось, что все зародыши γ→α-превращения возникают в соседних аустенитных зернах, разделенных РСУ-границей Σ3. На данной стадии моделирования из всех стабильных ориентировок аустенита отбирались «парные», находящиеся в двойниковой разориентации. Из производных от «парных» ориентировок γ-фазы отбирались ориентировки α-фазы, также находящиеся в двойниковой разориентации. Последние полагались основными ориентировками феррита, сформировавшимися в процессе ТМСР (таблица 2). Все возможные разориентации РСУ Σ3 (двойниковые) для обеих кубических решеток строились (подбирались) геометрически с использованием поворотов на 60° вокруг осей <111> или на 70,5° вокруг осей <110> [25].

Результаты и обсуждение

Для оценки результатов моделирования использовались результаты работы [26] по текстуре ТМСР (рисунок 1, а) в виде сечений функции распределения ориентировок (рисунок 1, а). Наложение ориентировок феррита на сечения ФРО показывает удовлетворительную сходимость результатов моделирования (рисунок 1, б).

Основные ориентации, сформировавшиеся в результате фазового превращения, в пределах их рассеяния могут быть описаны как пары двойниковых ферритных. Исключение составляет ориентация {001}<110>, которая в зависимости от режима ТМСР может существенно ослабляться, вплоть до исчезновения [13]. Ориентация {001}<110> является стабильной при деформации ОЦК решетки, и, согласно [13], ответственна за формирование расщеплений при разрушении. Поскольку изотермическая горячая прокатка происходит при температурах близких к A_{C3} для низкоуглеродистых трубных сталей, можно предположить, что ориентация {001}<110> формируется не при фазовом превращении, а в результате деформации феррита, образовавшегося в материале при температуре несколько ниже критической.

Таблица 1 – Пример расчета кристаллографических вариантов ориентации феррита, образующихся из ориентации аустенита (110)[001] в соответствии с ОС Курдюмова-Закса

№ варианта	Ориентации в индексах Миллера		Ориентация в виде проекции элементарной ячейки
	Расчётные (точные)	Приближенные*	
1	(0,075;1,391;0,242)[-0,075;0,167;0,983]	(010)[001]	
2	(0,742;0,575;1,058)[-0,742;0,650;0,167]	(111)[$\bar{1}$10]	
3	(-0,742;0,575;1,058)[0,742;0,650;0,167]	($\bar{1}$11)[110]	
4	(-0,075;1,391;0,242)[0,075;-0,167;0,983]	(010)[001]	
5	(0,667;0,483;1,150)[-0,667;0,742;0,075]	(112)[$\bar{1}$10]	
6	(-0,667;0,483;1,150)[0,667;0,742;0,075]	($\bar{1}$12)[110]	
7	(0,592;-0,908;0,908)[0,742;0,650;0,167]	(1$\bar{1}$1)[110]	
8	(-1,408;-0,092;0,092)[0,075;-0,167;0,983]	($\bar{1}$00)[001]	
9	(0,816;0,816;-0,816)[-0,667;0,742;0,075]	(11$\bar{1}$)[$\bar{1}$10]	
10	(0,816;-0,816;0,816)[0,667;0,742;0,075]	(1$\bar{1}$1)[110]	
11	(-1,408;0,092;-0,092)[-0,075;-0,167;0,983]	($\bar{1}$00)[001]	
12	(0,592;0,908;-0,908)[-0,742;0,650;0,167]	(11$\bar{1}$)[$\bar{1}$10]	
13	(1,408;-0,092;0,092)[-0,075;-0,167;0,983]	(100)[001]	
14	(-0,592;-0,908;0,908)[-0,742;0,650;0,167]	($\bar{1}\bar{1}$1)[$\bar{1}$10]	
15	(-0,592;0,908;-0,908)[0,742;0,650;0,167]	($\bar{1}\bar{1}$1)[110]	
16	(1,408;0,092;-0,092)[0,075;0,167;0,983]	(100)[001]	
17	(-0,816;-0,816;0,816)[-0,667;0,742;0,075]	($\bar{1}\bar{1}$1)[$\bar{1}$10]	
18	(-0,816;0,816;-0,816)[0,667;0,742;0,075]	($\bar{1}\bar{1}$1)[110]	
19	(0,667;0,483;1,150)[-0,667;-0,742;0,075]	(112)[1$\bar{1}$0]	
20	(-0,667;0,483;1,150)[-0,667;-0,742;-0,075]	($\bar{1}$12)[$\bar{1}\bar{1}$0]	
21	(0,075;1,391;0,242)[0,075;0,167;-0,983]	(010)[00$\bar{1}$]	
22	(0,742;0,575;1,058)[0,742;-0,650;-0,167]	(111)[1$\bar{1}$0]	
23	(-0,742;0,575;1,058)[-0,742;-0,650;-0,167]	($\bar{1}$11)[$\bar{1}\bar{1}$0]	
24	(-0,075;1,391;0,242)[-0,075;0,167;-0,983]	(010)[00$\bar{1}$]	

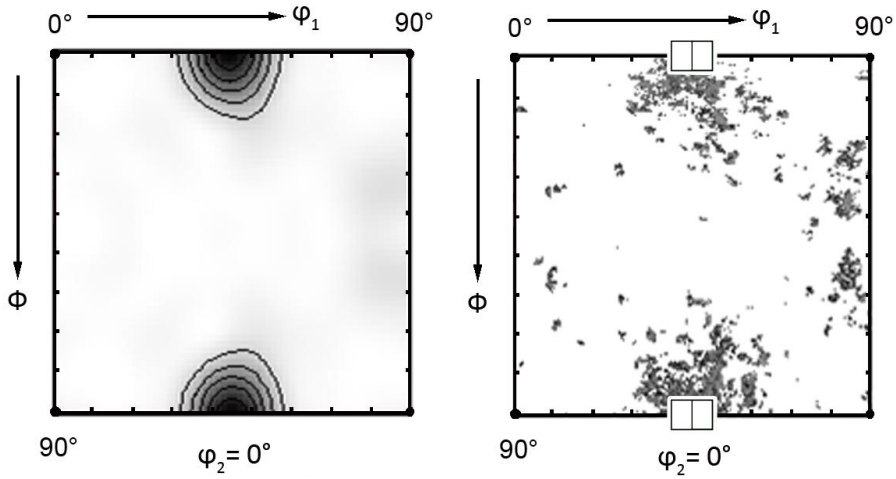
*Примечание: отклонение приближенных ориентаций от рассчитанных по всем углам составляет величину не более 15°.

Таблица 2 – Ориентации, формирующиеся в результате ТМСР

Стабильные ориентации ГЦК решетки [24]		Ориентация ОЦК решетки, возникающие в результате ТМСР	
Индексы Миллера	Ориентация в виде проекции элементарной ячейки	Индексы Миллера	Ориентация в виде проекции элементарной ячейки
(110)[001]			
(100)[010]			
$(011)[11\bar{1}]$		$(112)[\bar{1}10]$	
$(011)[1\bar{1}1]$		$(112)[1\bar{1}0]$	
$(011)[21\bar{1}]$		$(110)[\bar{1}11]$	
$(011)[2\bar{1}1]$		$(110)[1\bar{1}1]$	
$(112)[\bar{1}\bar{1}1]$		$(111)[\bar{1}\bar{1}2]$	
$(\bar{1}12)[1\bar{1}1]$		$(111)[11\bar{2}]$	

Заключение

Результатом моделирования является демонстрация того, что кристаллографическая текстура, формирующаяся в результате контролируемой термомеханической обработки низкоуглеродистой высокопрочной трубной стали, может быть представлена как совокупность ориентаций ОЦК решетки, образованных в результате сдвигового фазового превращения (ГЦК → ОЦК), в соответствии с известными ориентационными соотношениями (например, Курдюмова-Закса). Причем зарождение кристаллитов феррита происходит на границах между аустенитными зернами, связанными разориентацией решетки совпадающих узлов ∑3.



(а) (б)

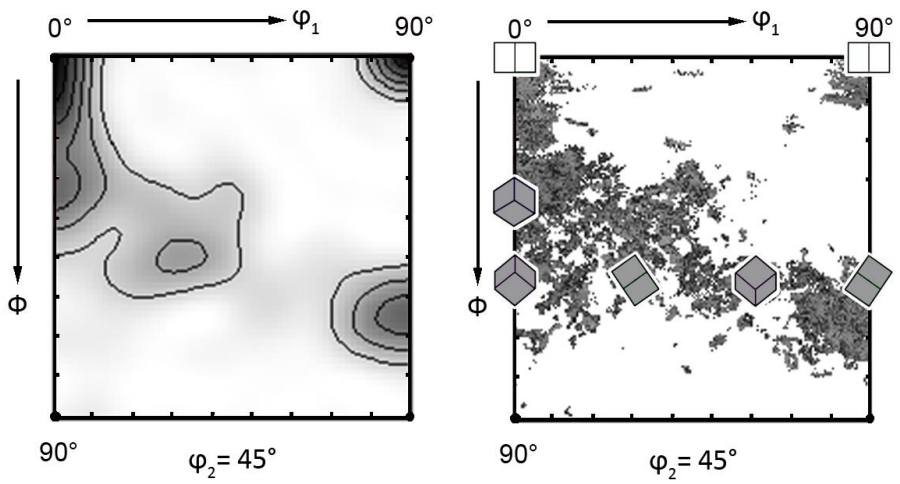


Рисунок 1 – Сравнение результатов моделирования с экспериментально зафиксированной текстурой ТМСР в виде сечений ФРО при $\varphi_2 = 0°$ и $\varphi_2 = 45°$: (а) – текстура ТМСР из [26]; (б) – то же, что на «а» с наложением ориентаций феррита, полученных моделированием

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента Российской Федерации (проект СП-3775.2021.1).

Библиографический список

1. Hutchinson B. Practical Aspects of Texture Control in Low Carbon Steels / B. Hutchinson // Materials Science Forum. – 1994. – Vol. 157, Iss. 6. – P. 1917–1928.
2. Lindell D. Texture evolution of warm-rolled and annealed 304L and 316L austenitic stainless steels / D. Lindell // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 82. – Art. 012101.
3. Is it Possible to Use Rolling Methods to Improve Textures on Fe–Mn–Si Shape Memory Alloys / A. V. Druker, C. Sobrero, V. Fuster [et al.]. – DOI 10.1002/ adem.201700062 // Advanced Engineering Materials. – 2017. – Vol. 20, Iss. 4. – Art. 1700062.
4. Humphreys F. J. Recrystallization and related annealing phenomena / F. J. Humphreys, M. Hatherly. – Oxford : ELSEVIER, 2004. – 574 p.
5. Хулка К. Тенденции разработки сталей для труб большого диаметра / К. Хулка, П. Петерс, Ф. Хайстеркамп // Сталь. – 1997. – № 10. – С. 62–67.
6. Shigeru E. Development of Thermo-Mechanical Control Process (TMCP) and High Performance Steel in JFE Steel / E. Shigeru, N. Naoki // JFE Technical Report. – 2015. – Vol. 20. – P. 1–7.
7. Obtaining high-quality properties of rolled material for large-diameter pipes based on formation of ferrite-bainite microstructure / Yu. D. Morozov, S. Yu. Nastich, M. Matrosov, O. N. Chevskaya. – DOI 10.1007/s11015-008-9003-5 // Metallurgist. – 2008. – Vol. 52, Iss. 1. – P. 21–28.

8. New steels for pipelines of strength classes K54-K60 (X70) : Production experience at OAO MMK / S. Y. Nastich, V. L. Kornilov, Yu. D. Morozov [et al.]. – DOI 10.3103/S0967091209050179 // Steel in Translation. – 2009. – Vol. 39. – P. 431–436.
9. Effects of carbon equivalent and cooling rate on tensile and Charpy impact properties of high-strength bainitic steels / H. K. Sung, S. Shin, B. Hwang [et al.]. – DOI 10.1016/j.msea.2011.10.015 // Materials Science and Engineering A. – 2011. – Vol. 530, Iss. 1. – P. 530–538.
10. Nano-sized precipitation and properties of a low carbon niobium micro-alloyed bainitic steel / Z. J. Xie, X. P. Ma, Ch. J. Shang [et al.]. – DOI 10.1016/j.msea.2015.05.101 // Materials Science and Engineering A. – 2015. – Vol. 641. – P. 37–44.
11. Goli-Oglu E. A. Effect of deformation regime in main stages of controlled rolling on pipe steel microstructure / E. A. Goli-Oglu, L. I. Éfron, Yu. D. Morozov // Metal Science and Heat Treatment. – 2013. – Vol. 55. – P. 294–297.
12. Влияние скорости охлаждения на структуру низкоуглеродистой низколегированной стали после контролируемой термомеханической обработки / М. Л. Лобанов, М. Л. Краснов, В. Н. Урцев [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2019. – № 1. – С. 31–37.
13. Влияние кристаллографической текстуры бейнита на разрушение листов трубных сталей, полученных контролируемой термомеханической обработкой / И. Ю. Пышминцев, А. О. Струин, А. М. Герасьев [и др.] // Металлург. – 2016. – № 4. – С. 57–63.
14. Данилов С. В. Причина формирования расщеплений при разрушении трубных сталей, изготовленных методом ТМСР / С. В. Данилов, Е. Р. Струина, М. Д. Бородина // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2017. – Т. 60, № 3. – С. 247–249.
15. Texture in hot rolled austenite and resulting transformation products / B. Hutchinson, L. Ryde, E. Lindh, K. Tagashira. – DOI 10.1016/S0921-5093(98)00820-X // Materials Science and Engineering A. – 1998. – Vol. 257, Iss. 1. – P. 9–17.
16. Texture Inheritance in the Ferrito-Martensite Structure of Low-Alloy Steel after Thermomechanical Controlled Processing / M. L. Lobanov, I. Pyshmintsev, V. N. Urtsev [et al.] // Physics of Metals and Metallography. – 2019. – Vol. 120, Iss. 12. – P. 1180–1186.
17. Ray R. K. Transformation textures in steels / R. K. Ray, J. J. Jonas // International Materials Reviews. – 1990. – Vol. 35. – P. 1–36.
18. Microtwinning as a common mechanism for the martensitic and pearlitic transformations / V. Kraposhin, I. Jakovleva, L. Karkina [et al.]. – DOI 10.1016/j.jallcom.2011.10.102 // Journal of Alloys and Compounds. – 2013. – Vol. 577. – P. S30–S36.
19. Крапошин В. С. Некристаллические симметрии кристаллической структуры цементита и ее превращений / В. С. Крапошин, А. Л. Талис // Цементит в углеродистых сталях : коллектив. моногр. / под. ред. В. М. Счастливцева. – Екатеринбург, 2017. – С. 186–188.
20. Лобанов М. Л. Кристаллографические особенности распада γ-фазы в

аустенитной коррозионно-стойкой стали / М. Л. Лобанов, В. И. Пастухов, А. А. Редикульцев // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2020. – № 7. – С. 5–11.
21. Лобанов М. Л. Влияние специальных границ на γ→α-превращение в аустенитной нержавеющей стали / М. Л. Лобанов, В. И. Пастухов, А. А. Редикульцев // Физика металлов и металловедение. – 2021. – Т. 122, № 4. – С. 424–430.
22. Pereloma E. V. The crystallography of carbide-free bainites in thermo-mechanically processed low Si transformation-induced plasticity steels / E. V. Pereloma, Al-Harbi Fayez, A. A. Gazder // Journal of Alloys and Compounds. –2014. – Vol. 615. – P. 96–110.
23. Специальные разориентации в низкотемпературном бейните высокоуглеродистой марганец-кремнистой стали, полученном в изотермических условиях / Н. А. Терещенко, И. Л. Яковлева, И. Г. Кабанова, Д. А. Мирзаев // Физика металлов и металловедение. – 2019. – Т. 120, № 9. – С. 954–961.
24. Danilov S. V. Hot-rolled texture of fcc and bcc metals / S. V. Danilov, P. L. Reznik // Solid State Phenomena. – 2018. – Vol. 284. – P. 605–609.
25. Кайбышев О. А. Границы зерен и свойства металлов / О. А. Кайбышев, Р. З. Валиев. – Москва : Металлургия, 1987. – 214 с.
26. Структурно-текстурные состояния штрипсов стали 06Г2МБ после контролируемой термомеханической обработки / С. И. Платов, М. Л. Краснов, В. Н. Урцев [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2020. – № 1. – С. 56–61.

УДК 621.311.243

Ладвищенко А.А., Лагунов А.Ю.

РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Аннотация. Богатства Арктики привлекают внимание многих стран мира. Для исследования в данном регионе необходимо иметь электропитание. Чаще всего исследователи работают в циркумполярном регионе в летнее время. В это время в Арктике достаточно много солнечной энергии. Мы предлагаем использовать для электропитания аппаратуры солнечные элементы. Для выбора солнечных элементов из множества предложений производителей их необходимо исследовать при низких температурах, которые чаще всего бывают в Арктике даже в весенне-летний период. Мы предлагаем установку для исследования солнечных элементов.

Ключевые слова: альтернативные источники энергии; солнечная батарея; производство энергии на солнечных элементах; выработка энергии; производство энергии; эффективность преобразования; низкие температуры; Арктика.

Abstract. The riches of the Arctic attract the attention of many countries around the world. For research in this region, it is necessary to have a power supply. Most often, researchers work in the circumpolar area during the summer. At this time, there is a lot of solar energy in the Arctic. We propose to use solar cells for the power supply of the equipment. To select solar cells from various manufacturers' proposals, they must be examined at low temperatures, most often found in the Arctic, even in the spring and summer. We offer a solar cell research facility.

Keywords: alternative energy sources; solar cell; solar cell power generation; power generation; energy productio; conversion efficiency; low temperatures; Arctic.

Введение

Экологическая ситуация в мире, а особенно в Артике продолжает ухудшаться. Многие страны, например [1-3], поднимают вопрос о том, чтобы использовать возобновляемые источники энергии. Страны Европы приняли Европейский зеленый курс, который призван улучшить состояние природный среды и в конечном виде, улучшить здоровье людей.

Исследователи Арктики испытывают колоссальные энергетические трудности. Например, см. [5]: «Энергоснабжение осуществляется отдельно в каждом районе за счет дизельных электростанций, топливо для которых поступает один раз в год для северных поставок. Как правило, это дизельные электростанции, обладающие низким КПД и высокими затратами на производство электроэнергии...». Это приводит к появлению зависимости населения от запасов топлива [6, 7]. В связи с этим следует рассмотреть и протестировать новые идеи в теории управления и высоких технологиях для достижения безопасного и эффективного преобразования и потребления энергии, например [8- 10].

Многие европейские исследователи считают, что наиболее прогрессивной является ветроэнергетика [11-13]. Но зимний сезон 2020-2021 годов показал, что ветрогенераторы малоэффективны в холодное время года. В Германии все альтернативные источники энергии составляют половину рынка, но во время аномально холодной погоды и снегопадов эта доля упала до 20%. Проверка лопастей ветряных турбин, например, с помощью беспилотных летательных аппаратов [14, 15], показала сильное обледенение, препятствующее выработке электроэнергии. Лопасти ветряка нужно обработать специальным составом, чтобы не замерзнуть, а это дорогое удовольствие. Многие энергетические компании были не готовы к постоянной переработке лопастей ветряных турбин, так как это привело бы к еще большим расходам. Многие европейские страны пережили кризисные моменты с невероятным трудом. В Арктике приходится бороться не только с оледенением, но и с сильными ветрами. Наши исследования по установке ветряных турбин провалились, потому что наша ветряная турбина на мысе Желание на Северном острове архипелага Новая Земля была разрушена сильным порывом ветра во время урагана [16].

Солнечные панели – это относительно простая система в установке, настройке и эксплуатации по сравнению с другими возобновляемыми источниками энергии. Использование солнечных модулей в Арктике зимой практически невыгодно, так как в полярную ночь солнечные батареи получают слишком мало световой энергии для выработки электроэнергии. Как показали наши эксперименты на мысе Желания на Северном острове архипелага Новая Земля, солнечной энергии вполне достаточно для выработки электроэнергии в переходный период и летом. Мы использовали интегрированную систему, состоящую из солнечных панелей, ветряных турбин и дизельных генераторов. Эта схема наиболее оптимальна при использовании в Арктике [17]. Схема использовалась для питания телекоммуникационного оборудования [18].

Эффективность солнечных панелей сильно зависит от температуры, при которой они используются. При повышении температуры процесс фотопреобразования нарушается, что приводит к снижению эффективности солнечных панелей [19]. В практических исследованиях, например [20, 21], было обнаружено, что солнечные панели подвергаются значительному нагреву ярким солнечным светом и интенсивным солнечным излучением. В результате интенсивного температурного воздействия снижается эффективность преобразования светового потока, что приводит к снижению мощности силовой установки, а иногда и к выходу из строя установки [22]. Часто конструкторы не учитывают коэффициент нагрева солнечных панелей от солнца и проводят расчеты по общим техническим характеристикам, которые указаны в технической документации, без учета температурных характеристик [23].

Исследования повышения температуры солнечного элемента проводились достаточно тщательно, например [24-26]. Значительно меньшее количество публикаций посвящено исследованиям солнечных панелей при отрицательных температурах. Однако, по данным метеорологов, в Арктике низкие температуры встречаются гораздо чаще, чем высокие [27]. Зимой минимальная температура опускается до -38 градусов по Цельсию. Летом она может подняться только до +12 градусов по Цельсию. Потому что температуры в Арктике всегда довольно низкие в течение всего года. Обозначим цель нашего исследования – проверить работу солнечных элементов в лабораторных условиях, имитирующих условия Арктики. В экспериментах с солнечными батареями мы установим диапазон температур от -38 до +12 градусов Цельсия.

Современные технологии, основанные на возобновляемых источниках энергии, предполагают снижение негативного воздействия человека на локальные климатические системы, например [28-30]; При этом эффективность таких инженерных систем зависит от соответствующих погодных факторов (колебания температуры, ветровые режимы, облачность и т. д.), на которые могут влиять, например, локальные изменения климата [31-33]. Точность основанного на модели расчета будущего в отношении ущерба, связанного с климатом, ограничена проблемой так называемой межгодовой изменчивости, например [34-37]; Итак, результаты исследований по использованию солнечных панелей в приполярном регионе могут помочь снизить технологический риск инженерных реализаций в конкретных региональных условиях.

Наш проект направлен на реализацию совместного проекта «Управление льдами Баренцева моря» Северного (Арктического) федерального университета (САФУ) [38] и Коларктик ПС 2014-2020 гг. Цель проекта– «улучшение доступа в регионы, развитие устойчивых и климатически устойчивых транспортных и коммуникационных сетей и систем» [39].

Образцы и методика эксперимента

Для исследования солнечных элементов необходим лабораторный стенд [40]. Мы провели исследование по выбору оправы. Лаборатория «Solar Lab» предназначена для практических исследований солнечных фотоэлектрических элементов и основана на платформе NI PXI [41]. Программное обеспечение было разработано в среде графического программирования NI LabVIEW. Анализ проводится на двух стендах: внутреннем и внешнем. Внешний стенд предназначен для исследований в естественных условиях с использованием солнечных лучей в качестве источника световой энергии. Внутренние стендовые исследования проводятся с использованием встроенной лампы в качестве источника световой энергии. Установку можно использовать для определения основных

характеристик солнечных элементов, таких как выходное напряжение холостого хода, ток короткого замыкания, вольт-амперная характеристика (VAC) при различных ориентациях панели и интенсивность источника света.

«Wind and solar power trainer» предназначен для обучения студентов характеристикам солнечных панелей и ветряных генераторов [42]. Используя этот тренажер, учащиеся смогут отслеживать такие данные, как выходной ток, напряжение и мощность от солнечных панелей и ветряных мельниц, кроме того, они смогут измерять температуру, скорость ветра, напряжение аккумулятора, ток нагрузки и т. Д. Разработано для использование с широким спектром платформ сбора данных и управления National Instruments; простые в использовании, легко расширяемые программируемые контроллеры автоматизации, интеллектуальные интерфейсы связи и надежные модули ввода / вывода.

Стенд 2.1 Investigating Solar Modules [43] позволяет проводить следующие исследования: тестирование оптимального выравнивания солнечных модулей; запись характеристик солнечных модулей; исследование реакции модуля на формирование тени; исследование того, как работают байпасные диоды; узнать о различных типах проводки и конфигурациях подключения для солнечных модулей.

Главный недостаток всех вышеперечисленных стендов – невозможность исследования солнечных элементов при низких температурах. Ранее мы проводили исследования [44, 45] с использованием климатической камеры PG-2J, но эти эксперименты не позволяли быстро работать с измерительным оборудованием. Мы создали новую установку, блок-схема которой показана на рисунке 1.

Солнечная панель подключена через цифровой вольтметр к Arduino Nano. При освещении прожектором солнечная панель вырабатывает ЭДС, и данные передаются на микроконтроллер, затем выводятся на дисплей. Arduino Nano получает информацию с датчика температуры, установленного внутри стенда, и выводит данные на дисплей. Температура задается при помощи кнопок. Элементы Пельтье, необходимые для нагрева или охлаждения воздуха внутри стенда, подключены к твердотельному реле, которое в свою очередь управляется микроконтроллером. Смена полярности на элементах Пельтье реализована с помощью переключателя полярности на четырех транзисторах.

Вентиляторы, элементы Пельтье и Arduino Nano питаются от блока питания постоянного тока на 12В, 360Вт. Прожектор питается от сети переменного тока 220В.

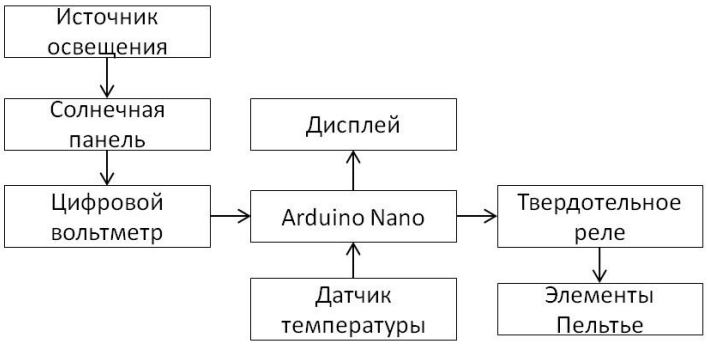


Рисунок 1 – Блок-схема установки

Результаты и обсуждение

Универсальный экспериментальный стенд (Рис.2а) для исследования солнечных элементов представляет собой ящик из фанеры, обшитый снаружи слоем теплоизоляционной фольги. По бокам стенда расположены кулеры для отвода тепла с элементов Пельтье. На крышке стенда расположен источник освещения.

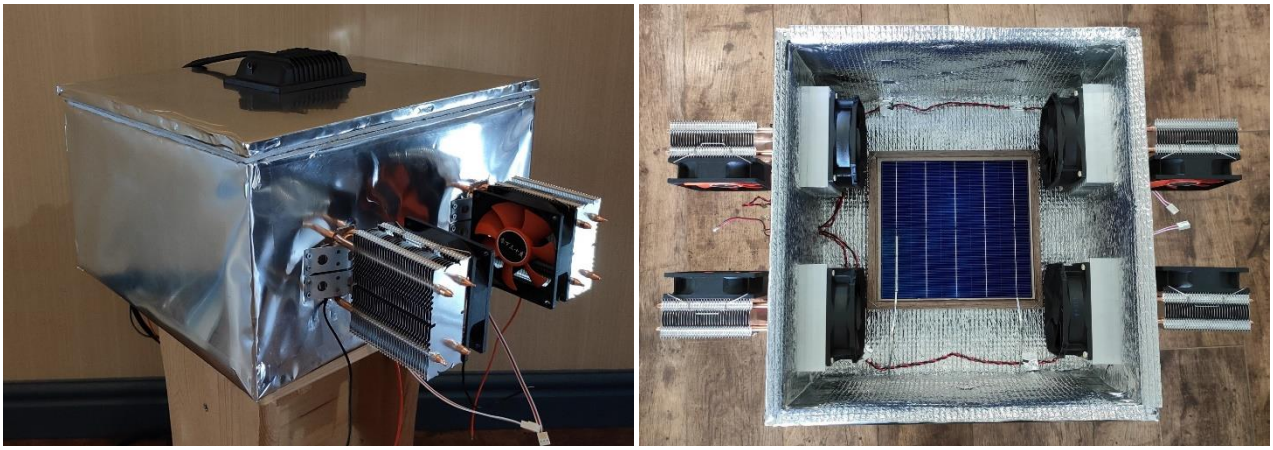


Рисунок 2 – Установка: а) внешний вид; б) внутреннее устройство

Внутренняя часть стенда (Рис.2б) обшита двумя слоями теплоизоляционных материалов: теплоизоляционная фольга и вспененный полиэтилен, покрытый с одной стороны слоем фольги. По бокам расположены радиаторы с вентиляторами, которые необходимы для отвода и распределения по камере тепла/холода. Под радиаторами расположены элементы Пельтье.

В центр стенда устанавливается солнечный элемент, закрывается крышка и включается источник освещения. Далее при помощи кнопок выбираем необходимую температуру (данные об ЭДС источника и температуре показаны на дисплее). При достижении необходимой температуры записываем показатели. Пример снятых показаний для солнечного элемента на графике зависимости E = f (T) в режиме холостого хода приведен на рисунке 3.

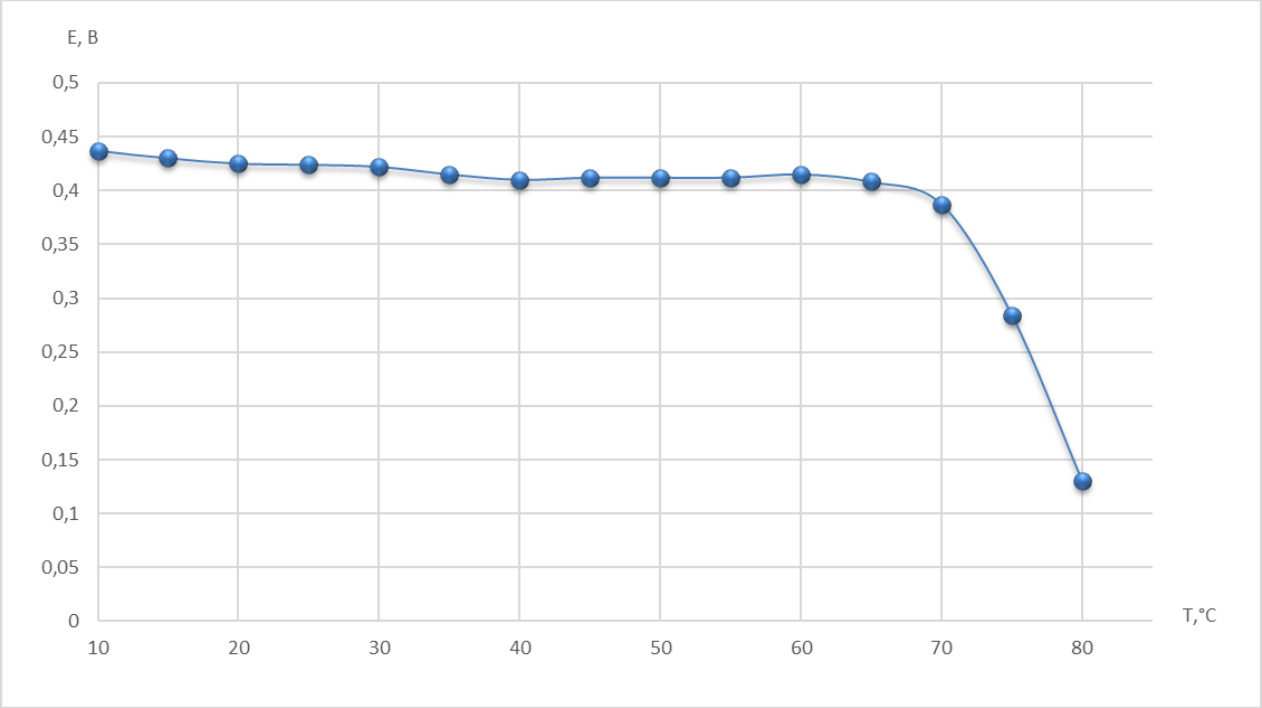


Рисунок 3 – График зависимости V = f (T) для солнечного элемента.

Заключение

Для исследования солнечных элементов, которые можно было бы применять в Арктике, необходимо создание установки, которая обеспечивает как высокие, так и низкие температуры. Мы создали установку, которая позволяет исследовать солнечные элементы в широком диапазоне температур.

Библиографический список

1. A roadmap for rapid decarbonization / J. Rockstrom, O. Gaffney, J. Rogelj [et al.]. – DOI 10.1126/science.aah3443 // Science. – 2017. – Vol. 355, Iss. 6331. – P. 1269–1271.
2. A low energy demand scenario for meeting the 1.5°C target and sustainable development goals without negative emission technologies / A. Grubler, Ch. Wilson, N. Bento [et al.] // Nature Energy. – 2018. – Vol. 3, Iss. 6. – P. 515–527.
3. Klimenko V. From Rio to Paris via Kyoto: How the Efforts to Protect the Global Climate Affect the World Energy Development / V. Klimenko, A. Klimenko, A. Tereshin // Thermal Engineering. – 2019. – Vol. 66, Iss. 11. – P. 769–778.
4. European Green Deal // European Commission [site]. – URL: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal en (date of access: 20.05.2021).
5. Batueva D. Increasing efficiency of using wind diesel complexes through intellectual forecasting power consumption / D. Batueva, J. Shklyarskiy // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. – 2019. – P. 434–436.
6. Lagunov A. The research of the complex of alternative energy to power the satellite

container / A. Lagunov, N. Podorojnyak. – DOI 10.1109/EUROCON.2017.8011137 // 17th IEEE International Conference on Smart Technologies, EUROCON 2017 : Conference Proceedings. – Ohrid, 2017. – P. 370–375.
7. Porous silicon and graphene-based nanostructures for novel solar energy systems / R. Smerdov, A. S. Mustafaev, Yu. M. Spivak, V. A. Moshnikov. – DOI 10.1088/1742-6596/1135/1/012038 // Journal of Physics Conference Series. – 2018. – Vol. 1135, Iss. 1. – P. 012038.
8. Kolokolov Y. A practice-oriented bifurcation analysis for pulse energy converters. Part 4. Emergency forecasting / Y. Kolokolov, A. Monovskaya. – DOI 10.1142/S0218127418500232 // International Journal of Bifurcation and Chaos. – 2018. – Vol. 28, Iss. 2. – P. 1850023.
9. Coma Bassas E. A review of the evolution of green residential architecture / E. Coma Bassas, J. Patterson, P. Jones // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2020. – Vol. 125, Iss. 3. – P. 109796.
10. Should we fear the rebound effect in smart homes? / J. Walzberg, T. Dandres, N. Merveille [et al.]. – DOI 10/1016/j.rser.2020.109798 // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2020. – Vol. 125. – Art. № 109798.
11. Poncela M. Pan-European analysis on power system flexibility / M. Poncela, A. Purvins, S. Chondrogiannis // Energies. – 2018. – Vol. 11, Iss. 7. – P. 1765.
12. Temperature characteristics of the photosensitive structures metal-AlGaN developed by vacuum thermal deposition / A. Anikina, S. A. Tarasov, I. A. Lamkin, G. Kontsevik // IOP Conference Series. Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 387, Iss. 1. – P. 012003.
13. Inertia Dependent Droop Based Frequency Containment Process / K. Das, M. Altin, D. Anca, P. Sorensen // Energies. – 2019. – Vol. 12, Iss. 9. – P. 1648.
14. Kulsinskas A. Internal wind turbine blade inspections using uavs: Analysis and design issues / A. Kulsinskas, P. Durdevic, D. Ortiz-Arroyo. – DOI 10.3390/en14020294 // Energies. – 2021. – Vol. 14, Iss. 2. – P. 294.
15. Lagunov A. Using UAVs for remote study of ice in the arctic with a view to laying the optimal route vessel / A. Lagunov, D. Fedin, A. Tyagunin. – DOI 10.15439/2014F226 // 2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems. – Warsaw, 2014. – P. 1293–1299.
16. Features of supply of telecommunications in the arctic / A. Lagunov, A. Surovtsev, V. Terekhin [et al.]. – DOI 10.1109/TELFOR.2014.7034531 // 22nd Telecommunications Forum Telfor. – Belgrade, 2014. – P. 814–817.
17. Terekhin V. Telecommunications equipment power supply in the Arctic by means of solar panels / V. Terekhin, A. Lagunov. – DOI 10.1063/1.4962605 // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1767. – P. 020021.
18. Lagunov A. The features of Ka-band in the north-western region of Russia / A. Lagunov, D. Fedin // 21st Telecommunications Forum Telfor : Proceedings of Papers. – Belgrade, 2013. – P. 149–152.
19. Evaluation of the 2013 southeast Asian haze on solar generation performance / M. Maghami, H. Hizam, Ch. Gomes [et al.]. – DOI 10.1371/journal.pone.0135118 // PLoS ONE. – 2015. – Vol. 10, Iss. 8. – P. e0135118.

20. Kudav G. Design and testing of wind deflectors for roof-mounted solar panels / G. Kudav, Y. Panta, M. Yatsco. – DOI 10.2495/AFM120021 // WIT Transactions on Engineering Sciences. – 2012. – Vol. 74. – P. 15–27.
21. The role of climatic-design-operational parameters on combined PV/T collector performance: A critical review / A. Elbreki, M. Alghoul, A. N. Al-Shamani [et al.]. – DOI 10.1016/j.rser.2015.11.077 // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol. 57. – P. 602–647.
22. Urban haze and photovoltaics / I. Peters, S. Karthik, H. Liu [et al.] // Energy and Environmental Science. – 2018. – Vol. 11, Iss. 10. – P. 3043–3054.
23. Techno-economic analysis of PV systems integrated into ship power grid: A case study / Y. Qiu, C. Yuan, J. Tang, X. Tang. – DOI 10.1016/j.enconman.2019.111925 // Energy Conversion and Management. – 2019. – Vol. 198, Iss. 15. – P. 111925.
24. A review of solar photovoltaic systems cooling technologies / A. G. Lupu, V.-M. Homutescu, D.-T. Balanescu [et al.]. – DOI 10.1088/1757-899X/444/8/082016 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 444, Iss. 8. – P. 082016.
25. Impacts of stratospheric sulfate geoengineering on global solar photovoltaic and concentrating solar power resource / C. Smith, J. A. Crook, R. Crook [et al.]. – DOI 10.1175/JAMC-D-16-0298.1 // Journal of Applied Meteorology and Climatology. – 2017. – Vol. 56, Iss. 5. – P. 1483–1497.
26. Simulation study of air and water cooled photovoltaic panel using ANSYS / Z. Syafiqah, N. A. Amin, M. I. Yusof [et al.]. – DOI 10.1088/1742-6596/908/1/012074 // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 908, Iss. 1. – P. 012074.
27. Weather archive : [official site]. – URL: https://rp5.ru (date of access: 20.05.2021).
28. Summary for policymakers of IPCC special report on global warming of 1.5°c approved by governments. – URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/11/pr181008P48spmen.pdf (date of access: 20.05.2021).
29. Accelerating changes in ice mass within Greenland, and the ice sheet's sensitivity to atmospheric forcing / M. Bevis, Ch. Harig, S. A. Khan [et al.]. – DOI 10.1073/pnas.1806562116 // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 2019. – Vol. 116, Iss. 6. – P. 1934–1939.
30. Enhanced eddy activity in the Beaufort Gyre in response to sea ice loss / T. Armitage, G. Manucharyan, A. A. Petty [et al.]. – DOI 10.1038/s41467-020-14449-z // Nature Communications. – 2020. – Vol. 11, Iss. 1. – P. 761.
31. Kolokolov Y. Guess-Work and Reasonings on Centennial Evolution of Surface Air Temperature in Russia. Part 4. Towards Economic Estimations of Climate-Related Damages from the Bifurcation Analysis Viewpoint / Y. Kolokolov, A. Monovskaya // International Journal of Bifurcation and Chaos. – 2016. – Vol. 26, Iss. 12. – P. 1630033.
32. Characterization of European wind speed variability using weather regimes / N. Cortesi, V. Torralba, N. Gonzalez-Reviriego [et al.]. – DOI 10.1007/s00382-019-04839-5 // Climate Dynamics. – 2019. – Vol. 53, Iss. 7/8. – P. 4961–4976.
33. Climatology and interannual variability of cloudiness in the Atlantic Arctic from

surface observations since the late nineteenth century / A. Chernokulsky, I. Esau, O. N. Bulygina [et al.]. – DOI 10.1175/JCLI-D-16-0329/1 // Journal of Climate. – 2017. – Vol. 30, Iss. 6. – P. 2103–2120.
34. Pezzulli S. The variability of seasonality / S. Pezzulli, D. Stephenson, A. Hannachi // Journal of Climate. – 2005. – Vol. 18, Iss. 1. – P. 71–88.
35. Essex C. Climate theory versus a theory for climate / C. Essex // International Journal of Bifurcation and Chaos. – 2011. – Vol. 21, Iss. 12. – P. 3477–3487.
36. Evolution of land surface air temperature trend / F. Ji, Z. Wu, J. Huang, E. P. Chassignet. – DOI 10.1038/nclimate2223 // Nature Climate Change. – 2014. – Vol. 4, Iss. 6. – P. 462–466.
37. Kolokolov Y. Guess-Work and Reasonings on Centennial Evolution of Surface Air Temperature in Russia. Part 5. Stability Margin Towards Emergency / Y. Kolokolov, A. Monovskaya // International Journal of Bifurcation and Chaos. – 2019. – Vol. 29, Iss. 5. – P. 1930013.
38. Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov : [official site]. – URL: https://narfu.ru/en/ (accessed: 20.05.2021).
39. Kolarctic CBC 2014–2020 : [official site]. – URL: https://kolarctic.info/kolartic-2014-2020/ (date of access: 20.05.2021).
40. Modeling and simulation of temperature effect in polycrystalline silicon PV cells / M. Marcu, N. Titu, R. I. Slusaric, F.-G. Popescu // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 133, Iss. 1. – P. 012005.
41. Solar Lab : [official site]. – URL: http://lab-store.org/en/energy-alternative-energy/69-wind-andsolar-power-trainer.html (date of access: 20.05.2021).
42. Wind and Solar Power Trainer : [official site]. – URL: http://lab-store.org/en/energy-alternativeenergy/67-solar-lab.html (date of access: 20.05.2021).
43. EPH 2.1 Investigating Solar Modules. – URL: https://www.lucasnuelle.com/316/apg/13223/EPH-21-Investigating-solar-modules.htm (date of access: 20.05.2021).
44. Lagunov A. Study of Solar Cells at Low Temperatures in the Arctic / A. Lagunov, A. Ladvishchenko, V. Terekhin. – DOI 10.1109/FarEastCon.2019.8933866 // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies. – Vladivostok, 2019. – URL: http//ieeexplore.ieee.org (date of access: 20.05.2021).
45. Ladvishchenko A. Problems of operation of solar cells at low temperatures in the Arctic / A. Ladvishchenko, A. Lagunov. – DOI 10.1063/5.0032297 // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2313, Iss. 1. – P. 060010.

УДК 621.315.1

Лисовенко А.С., Лимановская О.В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ОСНОВЕ УЧЕТА ДЕФЕКТНОСТИ ПРОВОДОВ И УСЛОВИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Аннотация. В статье представлены результаты разработки расширяемой мультиагентной модели технического состояния состояния воздушной линии электропередачи. С помощью программно реализованной модели проведено моделирование реально существующей линии электропередачи на основе информации, полученной в ходе ее диагностик.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, техническое состояние воздушной линии электропередачи, моделирование процессов, агентное моделирование.

Abstract. The article presents the results of the development of an expandable multi-agent model of the technical state of the overhead power transmission line. The software implemented multi-agent model was used to modelling real overhead power line based on information obtained as a result of its diagnostics.

Keywords: overhead power line, technical condition of overhead power line, process modeling, agent modeling.

Введение

Воздушные линии электропередач (ВЛ) составляют основу современных электрических сетей в РФ и являются важным звеном в передаче электроэнергии конечному потребителю. Старение воздушных линий электропередачи представляет одну из серьезнейших проблем для энергетической системы России. Общая степень изношенности электрический сетей в России составляет около 70% [1]. Как следствие, происходит ухудшение технического состояния электрических сетей, что является одним из основных факторов нарастания случаев нарушения их работы. Выходом из сложившийся ситуации является цифровая трансформация сетей, которая приводит к снижению потерь мощности, повышению надежности и доступности электроснабжения и создает ряд дополнительных услуг для потребителей [14-16].

Для решения текущих проблем в электроэнергетике ПАО Россети была разработана Концепция «Цифровая трансформация 2030» [2]. Одной из задач в рамках концепции является построение цифровой информационной системы и цифровых двойников линий электропередач. Под цифровым двойником системы подразумевается ее программный аналог, который в виртуальной среде имитирует технические характеристики и поведение своего реального прототипа [20].

Создание цифровых двойников ВЛ подразумевает под собой создание математической модели отслеживания и прогнозирования состояния ВЛ, ее составных частей и ее процессов. Такое отслеживание и прогнозирование с помощью модели дает сильный экономический эффект, который проявляется в более низких затратах на устранение отказов линий электропередачи, компенсацию потерь мощности и эксплуатационных расходов [3-7].

Для решения задачи построения математической модели отслеживания и прогнозирования состояния ВЛ, которая является сложной системой со множеством объектов, взаимодействующих между собой, в рамках данной работы был выбран метод агентного моделирования, который является перспективным метод для моделирования таких сложных систем [19].

Агентный подход для моделирования электрических сетей применялся, например, в работе [8] авторов Mikael M. Nordman и Matti Lehtonen, где агентная модель оценки состояния ВЛ строится для подстанций линий электропередач, каждой из которых ставится в соответствие агент, который с помощью различных датчиков отслеживает процессы, происходящие на отслеживаемой подстанции. Также в работе [9] авторов Ioannis S. Baxevanos и Dimitris P. Labridis было показано применение агентного моделирования для поиска дефектов в подземных ЛЭП, которые оснащаются собирающими информацию датчиками. В работе [10] авторов Jose Gonzalez de Durana, Oscar Barambones, Enrique Kremers и Liz Varga предлагается агентно-ориентированный подход к моделированию энергетических сетей с возможными несколькими поставщиками энергии. Предлагаемый расширяемый подход отличается высоким уровнем абстракции и основан только на математических уравнениях энергетических сетей, что позволяет моделировать энергосистему разных размеров.

Основной целью агентного моделирования в описанных выше работах является отслеживание и прогнозирования неисправностей генераторов и подстанций электрической сети, а также информирование об этих неисправностях. В описанных выше работах обобщается механическая составляющая одной из важнейшей части ЭЭС – линии электропередачи, а именно подробно не рассматривается ее техническое состояние, отслеживание и прогнозирование которого является не менее важной задачей, чем отслеживание электроэнергетической составляющей ЭЭС, т.к. механическая и электроэнергетическая составляющие тесно связаны друг с другом. Поэтому целесообразным является построение модели для отслеживания и прогнозирования технического состояния ВЛ с использованием перспективного для этого агентного подхода. Такая модель при последующем расширении до отслеживания электроэнергетической составляющей ВЛ (а впоследствии и ЭСС)

даст мощный инструмент информирования о состоянии электроэнергетической системы.

Для решения задачи построения цифровых двойников ВЛ в рамках данной работы представлено агентное моделирование состояния воздушной линии электропередачи, которое основано на официальной методике оценки технического состояния [11] и которое позволяет автоматически отслеживать и прогнозировать изменение состояния составных частей линии электропередачи при занесении в модель данных об обследованиях ВЛ.

Метод оценки технического состояния ВЛ

Согласно официальной методике [11] оценка технического состояния ВЛ основывается на вычислении индексов технического состояния составных частей ВЛ и осуществляется путем сопоставления фактических значений оцениваемых параметров функциональных узлов с предельно-допустимыми значениями. Для ВЛ функциональными узлами являются Опора и Пролет. Индекс технического состояния принимает значения в диапазоне от 0 (наихудшее значение) до 100 (наилучшее значение).

В приведенной ниже таблице 1 приводится диапазоны индекса технического состояния функциональных узлов (опоры и пролета) и самой линии электропередачи в целом.

Таблица 1 – Соответствие диапазонов индекса технического состояния с его описанием и цветов визуализации

Диапазон индекса технического состояния	Вид технического состояния	Визуализация(цвет)
[0; 25]	Критическое	Красный
(25; 50]	Неудовлетворительное	Оранжевый
(50; 70]	Удовлетворительное	Желтый
(70; 85]	Хорошее	Зеленый
(85; 100]	Очень хорошее	Зеленый

Каждый параметр технического состояния функционального узла оценивается в соответствии с балльной шкалой оценки отклонения фактических значений таких параметров от нормативных. Диапазон балльной шкалы – отрезок от 0 до 4.

В оценке индекса технического состояния опоры учитываются следующие элементы: изоляторы и арматура, сама опора и ее фундамент. В данной работе этот функциональный узел не учитывается.

Для оценки индекса технического состояния узла Пролет в рамках данной работы вводятся следующие группы параметров (1):

1) Состояние фазного провода и 2) Состояние грозотроса:

– Обрыв проволок в зажимах;
– Обрыв проволок вне зажимов;
– Стрела провеса;
– Коррозия провода;
– Опасность обрыва провода.

3) Состояние гасителя вибрации:

– Смещение гасителя вибрации;
– Наличие гасителя вибрации согласно проекту;
– Отсутствие грузов на гасителе вибрации.

4) Состояние трассы пролета:

– ДКР;
– Ширина просеки.

5) Габариты пролета:

– Габариты проводов.

Идея оценки технического состояния ВЛ заключается в вычислении снизу вверх индексов технического состояния групп параметров функциональных узлов, которые участвуют в вычислении индексов технического состояния самих функциональных узлов, которые, в свою очередь, участвуют в вычислении целевого индекса технического состояния ВЛ. Ниже приводится методика расчета индексов технического состояния.

Формулы расчета индексов технического состояния

1) Для оценки группы параметров функционального узла в рамках данной работы вводится показатель $ИТС_г$, который рассчитывается по следующей формуле:

$$ИТС_г = 100 * (b + \sum_i (w_i * Status_i/4)), \quad (1)$$

где $Status_i$ – балльная оценка i-го параметра группы, w_i – вес i-го параметра группы, b – поправочный коэффициент.

Расчет весов параметров группы и поправочного коэффициента в рамках данной работы основывается на машинном обучении регрессии на обучающей выборке, которая представляет собой пары (s_i,y_i), где s_i – элементы декартового произведения множеств возможных значений, деленных на 4, параметров рассматриваемой группы параметров функционального узла Пролет, а y_i – значение $\text{ИТС}_\text{г}/100$ для рассматриваемой группы.

2) Расчет индекса технического состояния функциональных узлов (ИТСУ) осуществляется по следующей формуле:

$$\text{ИТСУ} = \sum_i \left(w_i * \text{ИТС}_\text{г}\ _i\right), \quad (2)$$

где w_i – вес группы параметров с номером i, $\text{ИТС}_\text{г}\ _i$ – индекс технического состояния группы параметров с номером i.

В силу того, что в разрабатываемой модели групп параметров каждого типа может быть больше 1 и что веса групп одинакового типа равнозначны, вес группы параметров типа group обратно пропорционален общему количеству групп типа group рассматриваемого функционального узла.

3) Расчет индекса технического состояния единицы основного технологического оборудования (ИТС) осуществляется по следующей формуле [11]:

$$\text{ИТС} = min(\text{ИТСУ}i), i = 1 \ldots n, \quad (3)$$

где n – количество функциональных узлов-пролетов.

Агентная модель состояния ВЛ с учетом дефектности проводов и условий окружающей среды

В разрабатываемой в рамках данной работы агентной модели на текущем этапе разработки в качестве агентов представлены единица основного технологического оборудования – ВЛ, функциональный узел «Пролет» и группы параметров функционального узла «Пролет», а также окружающая среда. Для каждого из агентов сформированы списки параметров и состояний, заданы переходы между состояниями и влияние на связанные агенты.

Ниже, на рисунке 1, приведена диаграмма взаимосвязей агентов в нотации UML.

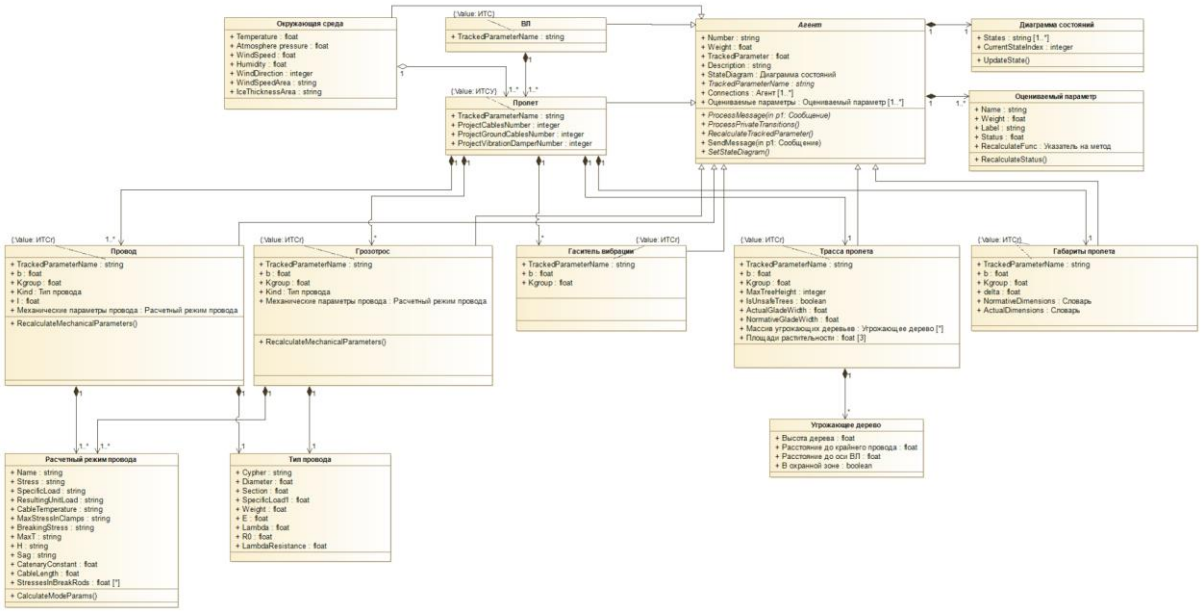


Рисунок 1 – UML-диаграмма взаимосвязей агентов разрабатываемой агентной модели

В качестве примера приводится описание одного из центральных агентов системы, агента «Провод».

Агент с помощью своих состояний и численного значения $ИТС_г$ характеризует отслеживаемый провод ВЛ. Он отвечает за вычисление, отслеживание и значений механических параметров провода, а также включает в себя оцениваемую группу параметров «Состояние фазного провода».

Состояния: Критическое, Неудовлетворительное, Удовлетворительное, Хорошее, Очень хорошее.

Параметры агента:

1) $ИТС_г$;

2) Вес группы $k_{group} = 0.364$;

3) Оцениваемые параметры группы: «Стрела провеса», «Коррозия провода», «Обрыв проволок в зажимах», «Обрыв проволок вне зажимов» и «Опасность обрыва провода»:

Каждый оцениваемый параметр группы характеризуется своим весом, балльной оценкой, текстовым описанием этой оценки и правилом оценивания.

4) Механические параметры провода:

Перерасчет механических свойств провода основывается на расчете удельных нагрузок на провод [12, Глава 2], численным решениям уравнения теплового баланса провода [13] и уравнения состояния провода [12, Глава 4].

5) Численное значение фазного тока [А];

6) Список оборванных проволок.

На рисунке 2 приведена диаграмма состояний агента «Провод».

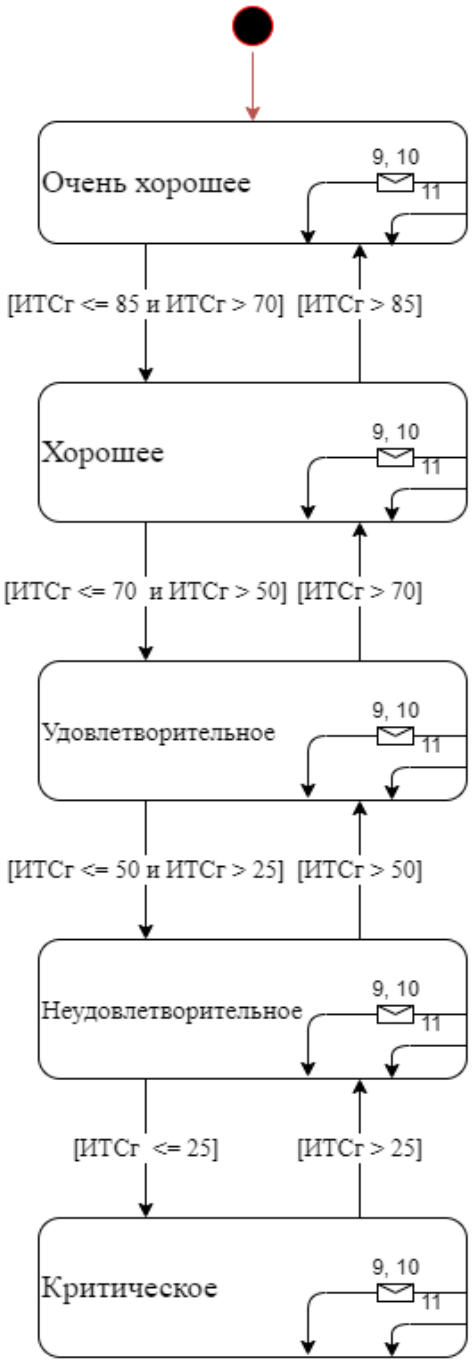


Рисунок 2 – Диаграмма состояний агента «Провод»

Условия переходов агента в соответствии с диаграммой состояний:

1) Переходы 1-8 основываются на соответствии индекса $ИТС_г$ диапазону значений из Таблицы 1.

2) Переход №9 – «Обработка сообщений от окружающей среды» и Переход №10 – «Обработка входящих сообщений от информационной системы ИС»:

Внутренние переходы, не изменяют состояние агента «Провод». Приводит к перерасчету механических параметров провода и переоценке параметров группы.

Это, в свою очередь, может повлиять на значение параметра $ИТС_г$, что может привести к смене состояния агента.

Условие перехода: основывается на получении пересылаемого агентом «Пролет» сообщения от агента «Окружающая среда» или сообщения от информационной системы ИС.

Действия при переходе:

– Обработка сообщения,

– Инициализация перерасчета механических свойств провода,

– Перерасчет $ИТС_г$.

3) Переход №11 – «Переоценка параметров группы после перерасчета провода»:

Внутренний переход, не изменяет состояние агента «Провод».

Условие перехода: перерасчет механических свойств отслеживаемого провода.

Действие при переходе: Переоценка параметров группы «Стрела провеса» и «Опасность обрыва провода» на основе рассчитанных механических параметров провода.

Реализация агентной модели

Разработка агентной модели ведется на языке программирования C# [17] с использованием для визуализации межплатформенной среды разработки Unity [18].

Каждый агент модели описывается соответствующим C#-классом. Далее под агентом подразумевается соответствующий ему C#-класс.

Согласно диаграмме взаимосвязей агентов (рисунок 1) был введен абстрактный C#- класс Agent, от которого наследуются все агенты модели.В абстрактном классе Agent приведены общие для всех агентов методы, а также модификатором abstract помечены те методы, реализация которых уникальна для каждого агента. При наследовании от класса Agent агент должен реализовать такие методы на основе своего описания.

Каждому агенту в соответствие ставится диаграмма состояний, которая описывается C#-классом StateDiagram. В классе StateDiagram в качестве поля представлен указатель на метод (делегат) типа Func<State>, который должен определить текущее состояние State диаграммы. Реализация метода, на который указывает делегат, предоставляется агентам при наследовании от абстрактного класса Agent.

Каждый оцениваемый параметр описывается объектом C#-класса Parameter. При инициализации агента заполняется массив оцениваемых параметров агента

путем инициализации объектов класса Parameter. При инициализации в конструктор необходимо передать имя параметра, его вес и указатель на метод (делегат) типа Func<(string,float)>, который является программной реализаций правила оценки параметра.

За счет введения абстрактного класса Agent и описанием каждого параметра объектом класса Parameter обуславливается расширяемость разрабатываемой агентной модели.

При запуске программы по требованию пользователя происходит загрузка информации об обнаруженных в ходе съема данных дефектах ВЛ, а также загружается трехмерная модель линии электропередачи, которая представляет собой соединенные облака точек попролетного лазерного сканирования.

На рисунке 3 представлен итоговый пользовательский интерфейс программы и загруженная трехмерная модель линии электропередачи.

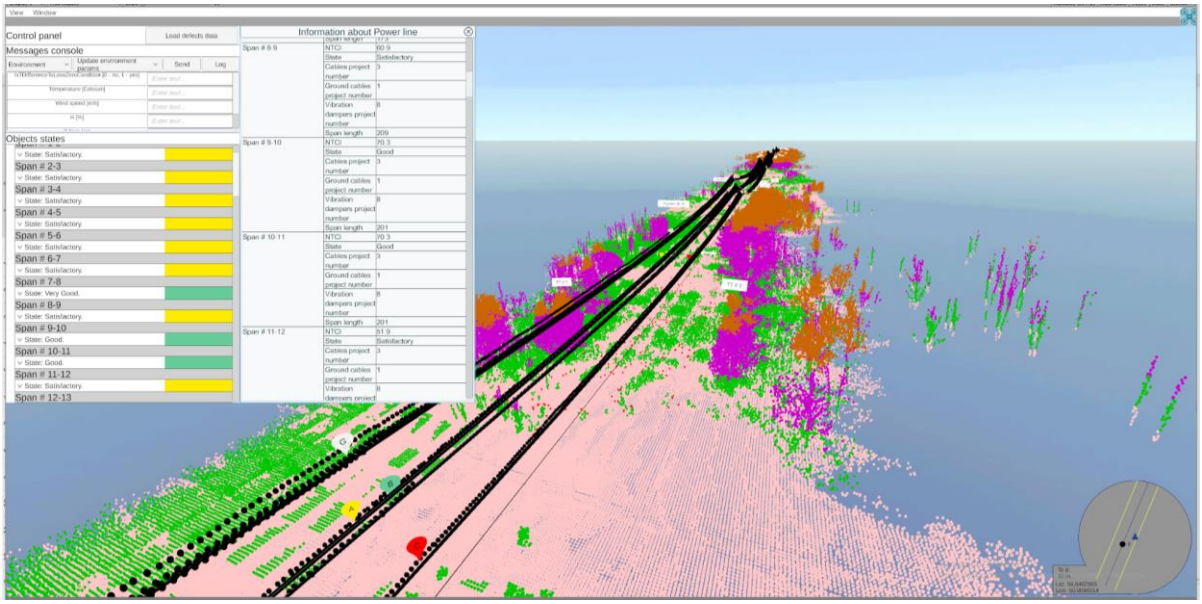


Рисунок 3 – Пользовательский интерфейс программы и визуализация в программе линии электропередачи в трехмерном виде

Пользовательский интерфейс состоит из:

1. Панель отображения состояний ВЛ и ее составных частей с возможностью вывода подробной информации о каждом объекте. Состояния помечаются цветовой отметкой и текстовым описанием. При нажатии на объект выводится подробная информация о нем, где содержатся значения индексов технического состояния, оцениваемых и прочих параметров.

2. Панель управления внешними сообщениями агентной модели, которая предназначена для возможности загрузки результатов диагностик ВЛ на разные периоды времени и для прогнозирования состояния ВЛ и ее составный частей

посредством программного моделирования различный ситуаций, как, например, смена условий окружающей среды.

Результаты и обсуждение

Для проведения моделирования была взята реально существующая линия электропередачи 110 кВ, которая располагается в Свердловской области, Россия. В результате осмотра данной ВЛ было проведено лазерное сканирование 50-ти пролетов ВЛ, была получена информация о дефектах, и подготовлены соответствующие информационные таблицы. Вся полученная информация и облака точек были занесены в агентную модель.

В результате программного моделирования после загрузки данных об диагностики ВЛ было выявлено, что у 18 пролетов индекс технического состояния находится в диапазоне от 50 до 70, что характеризуется удовлетворительным состоянием, у 15 пролетов индекс находится в диапазоне от 70 до 85 (Хорошее состояние). Остальные пролеты находились в очень хорошем состоянии. Основным источником снижения индексов технического состояния стало обилие растительности в пролетах, нарушающей соответствующие нормативные значения.

По результатам программного прогнозирования были выявлены опасности обрывов проводов в ряде проблемных пролетов при сильных минусовых температурах, которые характерны для местоположения линии электропередачи, а также выявлены нарушения нормативных значений расстояний от проводов до объектов при прогнозировании высоких температур окружающей среды.

Заключение

Представленная в данной работе расширяемая агентная модель состояния воздушной линии электропередачи позволяет на основе автоматического расчета индексов технического состояния отслеживать техническое состояние ВЛ и ее составных частей при занесении в модель данных о диагностиках линии электропередачи. Также агентная модель позволяет прогнозировать изменение технического состояния ВЛ и ее составных частей при различных задаваемых условиях.

При последующем расширении агентная модель будет включать в себя оценку технического состояния второго функционального узла линии электропередачи «Опора», также перспективной задачей является расширение агентной модели до отслеживания электроэнергетической системы в целом.

Библиографический список

1. Степень изношенности электрический сетей в России // ELEC.RU : электротехн. интернет-портал. – 2017. – URL: https://www.elec.ru/news/2017/12/27/gk-moskabelmet-stepen-iznoshennostielek-tricheskih.html (дата обращения: 18.07.2021).
2. Концепция «Цифровая трансформация 2030» // ПАО «Россети» : офиц. сайт. – Москва, 2021. – URL: https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifro-vaya_trans-formatsiya_2030.pdf (дата обращения: 18.07.2021).
3. Kishore T. S. Optimal economic planning of power transmission lines: A review / T. S. Kishore, S. K. Singal // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2019. – Vol. 39. – P. 949–974. – URL: https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsi-frovaya_trans-formatsiya_2030.pdf (date of access: 18.07.2021).
4. A new methodology of fault location for predictive maintenance of transmission lines / P. Silva, M. M. Negrao, P. V. Junior. – DOI 10.1016/j.ijepes.2012.04.057 // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2012. – Vol. 42, Iss. 1. – P. 568–574.
5. Ferreira E. F. Faults monitoring system in the electric power grid of medium voltage / E. F. Ferreira, J. D. Barros. – DOI 10.1016/j.procs.2018.04.123 // Procedia Computer Science. – 2018. – Vol. 130. – P. 696–703.
6. Samadi M. Midterm system level maintenance scheduling of transmission equipment using inspection based model / M. Samadi, H. Seifi, M. R. Haghifam. – DOI 10.1016/j.ijepes.2019.03.050 // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2019. – Vol. 110. – P. 467–476.
7. A routing algorithm for inspecting grid transmission system using suspended robot: Enhancing cost-effective and energy efficient infrastructure maintenance / B. Nagarajan, Yu Li, Z. Sun, R. Qin. – DOI 10.1016/j.jclepro.2019.02.088 // Journal of Cleaner Production. – 2019. – Vol. 219, Iss. 1. – P. 622–638.
8. Nordman M. M. Distributed Agent-Based State Estimation for Electrical Distribution Networks / M. M. Nordman, M. Lehtonen // IEEE Transactions. – 2005. – Vol. 20, Iss. 2. – P. 652–658.
9. Baxevanos I. S. Implementing Multiagent Systems Technology for Power Distribution Network Control and Protection Management / I. S. Baxevanos, D. P. Labridis // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2007. – Vol. 22, Iss. 1. – P. 433–443.
10. Agent based modeling of energy networks / J. M. Gonzalez de Durana, O. Barambones, E. Kremers, L. Varga. – DOI 10.1016/j.enconman.2014.03.018 // Energy Conversion and Management. – 2014. – Vol. 82. – P. 308–319.
11. Методика оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей // DOCS.CNTD.RU : электрон. фонд нормат.-техн. и нормат.-правовой информации. – URL: https://docs.cntd.ru/document/ (дата обращения: 06.08.2021).
12. Бошнякович А. Д. Механический расчет проводов и тросов линий электропередачи / А. Д. Бошнякович. – 2-е изд. – Ленинград : Энергия, 1971. – 254 с.

13. Попова Е. В. Усовершенствование алгоритмов расчета потокораспределения в электроэнергетических системах с учетом текущего температурного режима воздушных линий электропередачи : спец. 05.14.02 «Электр. станции и электроэнергет. системы» : дис. … канд. техн. наук / Е. В. Попова ; Ин-т систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сиб. отд. Рос. акад. наук. – Иркутск, 2017. – 172 с.
14. Which digital energy services improve energy efficiency? A multi-criteria investigation with European experts / K. Goldbach, A. M. Rotaru, S. Reichert [et al.]. – DOI 10.1016/j.enpol.2017.12.036 // Energy Policy. – 2018. – Vol. 115. – P. 239–248.
15. Morley J. Digitalisation, energy and data demand: The impact of Internet traffic on overall and peak electricity consumption / J. Morley, K. Widdicks, M. Hazas. – DOI 10.1016/j.erss.2018.01.018 // Energy Research & Social Science. – 2018. – Vol. 38. – P. 128–137.
16. Improving the efficiency of using small-distributed generation systems through mechanisms of demand management for electricity and gas / I. Baev, A. Dzyuba, I. Solovyeva, N. Kuzmina. – DOI 10.2495/eq-v3-n4-277-291 // International Journal of Energy Production and Management. – 2018. – Vol. 3, Iss. 4. – P. 277–291.
17. C# documentation // Библиотека технической документации. – URL: https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp/ (дата обращения: 06.07.2021).
18. Unity User Manual // Библиотека технической документации : платформы разработки Unity. – URL: https://docs.unity3d.com/Manual/index.html (дата обращения: 06.07.2021).
19. Borshchev A. From System Dynamics and Discrete Event to Practical Agent Based Modeling: Reasons, Techniques, Tools / A. Borshchev, A. Filippov // ECON : Iowa State University, Department of Economics. – URL: http://www2.econ.iastate.edu/tesfatsi/systemdyndiscreteeventabmcompared.borshchevfilippov04.pdf (date of access: 06.07.2021).
20. Подход IBM к реализации концепции цифровых двойников // CONTROLENG : науч.-техн. изд. – URL: https://controleng.ru/innovatsii/cifrovye-dvojniki/podhod-ibm/ (дата обращения: 06.07.2021).

УДК 681.785.235

Лукашов А.С., Вдовкин В.А., Трофимова Е.С., Пустоваров В.А.

ПРОГРАММНАЯ И АППАРАТНАЯ МОДЕРНИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКОЙ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Аннотация. Описана аппаратно-программная модернизация установки фотолюминесцентной спектроскопии, изготовленной в лаборатории физики твёрдого тела Уральского Федерального университета. Разработан новый аппаратно-программный комплекс управления и рассмотрена элементная база, удовлетворяющая поставленным задачам. Приведены результаты тестов, которые указывают на успешность модернизации. Реализованные технические решения могут быть использованы для автоматизации спектроскопических измерений в различных лабораториях.

Ключевые слова: аппаратно-программный комплекс, установка фотолюминесцентной спектроскопии, трансимпедансный усилитель, шаговый двигатель, интенсивность люминесценции, счетчик импульсов, температурные измерения.

Abstract. The hardware and software upgrade of the custom-built photoluminescence spectroscopy setup, installed in the Laboratory of Solid State Physics in Ural Federal University. A new hardware and software package for managing the installation has been developed and the element base that meets the tasks set has been considered. The results of tests that indicate the success of the upgrade are presented. The implemented technical solutions can be used to automate spectroscopic measurements in various laboratories.

Keywords: hardware and software package, photoluminescence spectroscopy unit, transimpedance amplifier, stepper motor, luminescence intensity, pulse counter, temperature measurements.

Введение

Созданный в лаборатории физики твёрдого тела фотолюминесцентный (ФЛ) спектрометр уже много лет активно используется в учебном процессе и в научной деятельности.

Используемая в настоящее время версия установки была создана в 2008 г. с применением шаговых двигателей (ШД) неоправданно высокой мощности, что при длительной работе приводило к перегреву силовых коммутаторов и к сбоям в работе блока управления ШД. Была поставлена задача модернизации установки путём применения новых аппаратных решений, использования современных маломощных ШД.

Аппаратная часть

На этой установке, собранной с применением отдельных типичных блоков и приборов, возможно проведение измерений следующих спектров:

– фотолюминесценции (область энергий 1,0 – 5,5 эВ);
– возбуждения фотолюминесценции (2,5 – 6,0 эВ);
– отражения (2,0 – 6,0 эВ).

Возможно исследование конденсированных сред, т. е. как твердых тел, так и жидкостей, с применением специальной кварцевой кюветы, вставляемой в криостат вместо кристаллодержателя.

При работе с кристаллами рабочий диапазон температур составляет 80 – 600 К. В качестве источников возбуждения применяются: дейтериевые лампы мощностью 30 или 400 Вт со сплошным спектром излучения в УФ–области, ртутная лампа ДРК–120 с линейчатым спектром, лазер типа ЛГИ–21. Регистрация люминесценции проводится фотоэлектронными умножителями типа ФЭУ–106 или R6358-10, R5208 (охлаждаемый для ИК диапазона) фирмы Hamamatsu, работающими в одноэлектронном режиме.

Стоит отметить, что все измерения проводятся в автоматизированном режиме, управление монохроматором и запись спектра на ПЭВМ осуществляет аппаратно-программный комплекс (АПК), оператор лишь задает параметры записи спектра и условия эксперимента [3].

Результаты модернизации наглядно можно представить на сравнении структурных схем старого варианта установки и нового (рисунок 1).

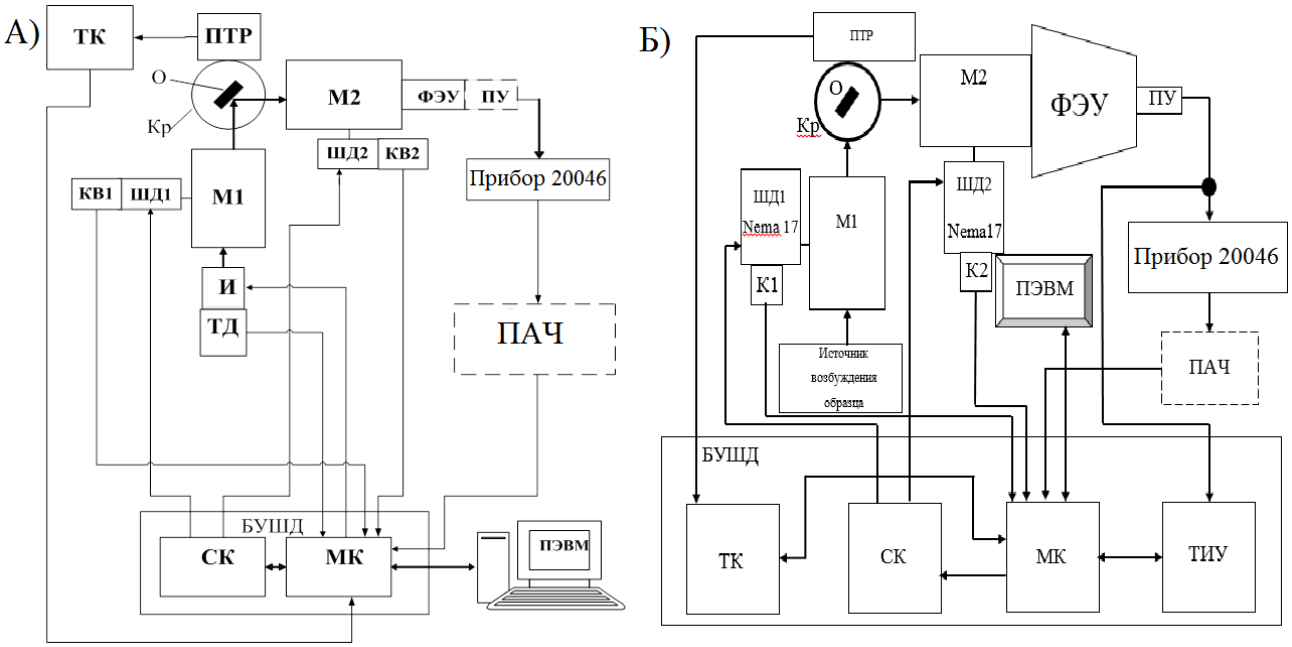


Рисунок 1 – структурные схемы старого (А) и нового (Б) АПК:
ПТР – платиновый терморезистор, О – образец, Кр – криостат, ШД – шаговый двигатель, М – монохроматор, К – концевой выключатель, БУШД – блок управления шаговыми двигателями, И – источник возбуждения, ПАЧ – преобразователь амплитуда-частота, ФЭУ – фотоэлектронный умножитель, ПУ – предусилитель, ТИУ – трансимпедансный усилитель, МК – микроконтроллер, СК – силовой коммутатор, ТК – плата температурных измерений.

На установке используются два призменных двойных монохроматора типа ДМР-4. Первый (М1) с кварцевыми призмами используется для выделения длины волны возбуждающего излучения (или при измерении спектра возбуждения люминесценции), а второй (М2) с кварцевыми или стеклянными призмами для выделения длины волны свечения образца (при измерении спектра люминесценции). Данные монохроматоры позволяют проводить измерения в диапазоне длин волн: от 210 нм до 1200 нм для кварцевых призм (обратная линейная дисперсия 10 А/мм в области 250 нм) и от 380 до 1200 нм для стеклянных призм.

В АПК автоматизирован процесс вращения регулировочного барабана при помощи шаговых двигателей, который посредством червячной передачи и рычагов управляет положением призм, тем самым изменяя длину волны. К тому же уже в программном обеспечении (ПО) учитывается, что каждый монохроматор обладает своей градуировочной характеристикой – зависимостью энергии (длины волны) выделяемого излучения от делений барабана монохроматора.

Для вращения барабана монохроматоров ранее использовались шестифазные шаговые двигатели ШД-5Д1М. Как видно из таблицы 1, преимуществом данных двигателей является малый шаг и большой крутящий и статический момент. Однако недостатком этих двигателей является их большая мощность и, следовательно, большое энергопотребление. Использование данных двигателей не оправдано в установке, так как для вращения барабанов монохроматоров требуется небольшой крутящий момент (приблизительно 500 гс·см). Следовательно, шаговые двигатели нуждались в замене на менее мощные.

Во время постановки задачи были предъявлены требования к новым ШД. Они должны обеспечивать достаточный крутящий момент для вращения барабана монохроматора (более 500 гс·см), при этом они должны потреблять малую мощность и иметь небольшие габаритные размеры. Шаг угла поворота двигателей должен быть не более 3 градусов. Кроме того, двигатели должны быть достаточно распространены, недороги и универсальны для замены в случае выхода из строя или аналог в случае нехватки мощности двигателя. Исходя из этих требований был выбран ШД из ряда NEMA-17.

Для регистрации люминесценции обычно используется высокочувствительный ФЭУ Hamamatsu R6358-10. Так как ФЭУ работает в одноэлектронном режиме, для подсчета импульсов с ФЭУ используется радиометр «Robotron 20046». Работа радиометра сводится к подсчёту одноэлектронных импульсов от ФЭУ при непрерывной записи спепкра. При использовании импульсного источника света из-за очень большой интенсивности в импульсе ФЭУ переходит в токовый режим, и радиометром регистрируется один импульс очень большой амплитуды. Поэтому в таком режиме анализатор импульс-

Таблица 1 – Сравнение старых и новых шаговых двигателей

Параметр	ШД-5Д1М	NEMA-17
Напряжение питания, В	48 (+4,8/-7,2)	12
Ток в обмотке, А	3	1,2
Единичный шаг, градус	1,5	1,8
Макс. статический момент, гс·см	>4000	2500
Макс крутящий момент, гс·см	>1000	2500

ных амплитуд показывает частоту следования импульсов, и становится

непригоден для измерений. Для таких случаев был разработан преобразователь амплитуда-частота (ПАЧ), который в качестве входной информации брал выходной импульс усилителя прибора 20046, амплитуда которого была пропорциональна интенсивности люминесценции. Получаемые импульсы выравнивались по амплитуде, и с помощью схемы преобразования напряжение-частота переводились в последовательность прямоугольных импульсов с частотой, пропорциональной амплитуде входного напряжения. Чтобы «поймать» импульс в максимуме кинетики в схеме перед преобразователем стоит устройство выборки-хранения (УВХ). После выхода напряжения с усилителя приходил сигнал с амплитудного дискриминатора, который служил для открытия аналогового ключа для пропуска напряжения на преобразователь. Данная схема предназначалась для работы при частоте возбуждающего импульса не более 100 кГц, так как постоянная времени УВХ составляла 10 мс.

Схема позволяет также проводить и температурные измерения. Как видно из рисунка 1, в новом АПК, благодаря современной электронной базе, появилась возможность отказаться от дополнительной платы температурных измерений. Общая схема включения терморезистора по четырехпроводной схеме в измерительный мост осталась прежней и представляет из себя измерительный мост (Уитсона). Сам сигнал с измерительного моста идёт на аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) единственного микроконтроллера в АПК, в отличие от предыдущего варианта, когда аналоговый сигнал предварительно обрабатывался дополнительным контроллером.

В качестве силовых коммутаторов (СК) были выбраны микросборки с драйверами A4988 производства Allegro. Драйвер выполнен на Н-мосту, который позволяет управлять вращением двигателя как в прямом, так и в обратном

направлении. Ключи в мосту выполнены на полевых транзисторах с изолированным затвором, открытие которых осуществляется зарядовым насосом. Схема не обладает отдельным механизмом форсирования двигателей, так как ее работа заключается в подаче максимального напряжения (напряжение питания 12 В) на двигатели, путем открытия ключей. Ключи открываются на определенное время, задаваемое длительностью заполнения ШИМ-сигнала. Сигнал формируется, исходя из напряжения на токочувствительном резисторе, падение напряжения на котором зависит от тока в обмотках двигателей. Выбранные микросборки удобны тем, что имеют в составе переменный резистор, регулируя который, можно достаточно просто задавать номинальный ток, необходимый двигателю для вращения. Этот резистор является плечом делителя, отвечающего за опорное напряжение, с которым сравнивается напряжение на токочувствительных резисторах.

Для управления комплексом и связи с персональным компьютером был выбран микроконтроллер (МК), основные характеристики которого приведены в таблице 2. Было принято решение выбрать распространенные и недорогостоящие контроллеры серии STM32 на ядре ARM Cortex-M3. Выбранный контроллер STM32F100RBT6B установлен на отладочной плате с предварительно установленными необходимыми элементами, таких как кварцевые резонаторы, обвязка по питанию, функциональные кнопки и прежде всего встроенный отладчик ST-link V1. Такая сборка позволит отлаживать ПО МК не отключая ее от АПК, что сделает настройку и отладку работы всего АПК быстрой и удобной, а встроенная кнопка «reset» позволит перезагрузить контроллер вручную в случае критической ошибки или сбоя.

Таблица 2 – Основные характеристики МК

Параметр	Значение
Разрядность АЦП	12
Время преобразования АЦП, мкс	1,2
Максимальное оцифровываемое напряжение, В	3,3
Разрядность счетчика	16
Максимальная скорость счета, имп/с	$24 \cdot 10^6$
Число свободных портов ввода-вывода	53

Помимо стандартных портов микросборка имеет выходы питания на 5 и 3,3 В, что удобно для организации логического питания или ограничителей напряжения для защиты линий АЦП, что и было реализовано в данном проекте.

Питание всей установки и МК, в частности, осуществляется от компьютерного блока питания мощность 200 Вт. Для питания МК достаточно

подвести 5 В питания к соответствующему выводу микросборки, стабильность питания обеспечивают уже установленные на сборку стабилизаторы и конденсаторы.

Монтаж микросборки на плату осуществляется за счет соединения вилка-розетка стандартными штырьковыми разъемами 2,54 мм (вилка распаяна на плате МК, а розетка на плате АПК). Таким образом плату можно быстро заменить на новую в случае ее выхода из строя либо поставить на ее место плату с другим МК, с учетом того, что для такого-же форм-фактора будет выполнена ее трассировка с соответствием выводов АПК и портов ввода-вывода нового МК.

Для связи с ПЭВМ используется интерфейс USB в режиме virtual COM-port, который для условий лаборатории ФТТ обладает достаточной помехозащищенностью (современные USB-кабели экранированы, а протоколы улучшены для повышения помехозащищённости). Это позволит избавиться от предыдущего решения гальванической развязки и использования интерфейса «токовая петля» с преобразователем токового сигнала на стороне ПЭВМ.

Гальваническая развязка осуществляется с помощью универсальной схемы ADuM1201 (DD2), которая удобна тем, что помогает развязать 2 линии связи (RX, TX) и питание и занимает намного меньше места, чем оптопара с резисторами. Кроме того, она обладает прямым и обратным каналом, что сказывается на удобстве подключения, а из-за наличия независимого питания позволяет преобразовывать уровни сигналов (например, 3,3 и 5 В).

Так как отладочная плата имеет только UART-интерфейс, то для связи с ПЭВМ после устройства гальваноразвязки включен преобразователь UART-USB на микросборке с чипом CP2102 и интегрированным micro-usb портом.

Согласно вышесказанному, была разработана принципиальная схема АПК. Предыдущая схема была избавлена от дополнительного МК и, как следствие, от неиспользуемых интерфейсов и линий связи. Схему можно разделить на 4 части: три измерительных тракта: тракт измерения частоты аналитических сигналов с прибора 20046, тракт температурных измерений и тракт измерения тока ФЭУ; другая часть схемы содержит в себе МК, который обрабатывает полученную информацию с каждого измерительного тракта и управляет режимом температурных измерений, а также усилением сигнала с ТИУ; далее располагается узел связи – гальваноразвязка с ПЭВМ с помощью схемы ADuM1202 и преобразователя интерфейсов USB-UART; затем идут СК – драйверы ШД, управляемые непосредственно МК. Для реализации захвата двигателей при данном решении невозможно выборочно подать напряжение на какую-либо обмотку ШД, поэтому захват-освобождение двигателей осуществляется управляемой подачей напряжения питания на СК. Фотография изготовленного АПК представлен на рисунке 2.

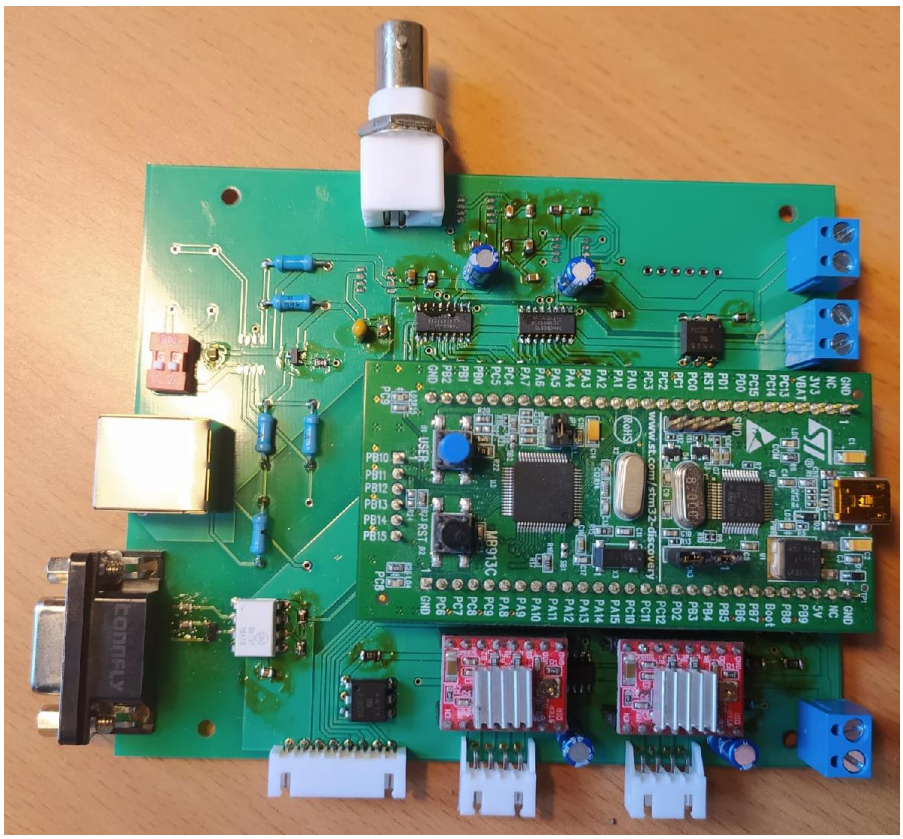


Рисунок 2 – Фотография изготовленной платы

Программная часть

Управление всей установкой осуществляется непосредственно с персонального компьютера при помощи специально созданного программного обеспечения LumDrive. Данная программа написана на языке C++ с использованием технологии MFC (Microsoft Foundation Class) в среде MS Visual Studio 2005. Программа использует многодокументный интерфейс (MDI), позволяющий просматривать одновременно несколько отснятых спектров. Выходной формат файлов – текстовый, совместим с программой Origin версии 6.0 и выше. В выходном файле сохраняются также все параметры эксперимента.

Программное обеспечение (ПО) позволяет вводить основные установочные параметры при записи спектра: время экспозиции в точке, диапазон измерения, число шагов ШД, а также отображает записываемый спектр на мониторе и автоматически сохраняет в текстовый файл формата *.dat. К тому же, в программе уже учитываются, градуировочные характеристики каждого монохроматора, что позволяет точно перевести деление барабана монохроматора в энергию (длину волны).

В состав программы входят: основная программа управления установкой LumDrive.exe; динамическая библиотека Protocol.dll, реализующая протокол связи ПЭВМ и контроллера БУШД. Написана с использованием технологии API; программа Terminal.exe, являющаяся простым интерфейсом пользователя к

библиотеке Protocol.dll, и позволяющая передавать и принимать произвольные блоки данных с использованием этого протокола. Удобна для отладки как контроллера, так и основной программы LumDrive.exe; калибровочные файлы монохроматоров svl-quartz.dmr и sl-quartz.dmr, содержащие их градуировочные характеристики (см.п. 1.1.3); стандартные библиотеки, необходимые для функционирования программы. Внешний вид программы LumDrive представлен на рис. 3.

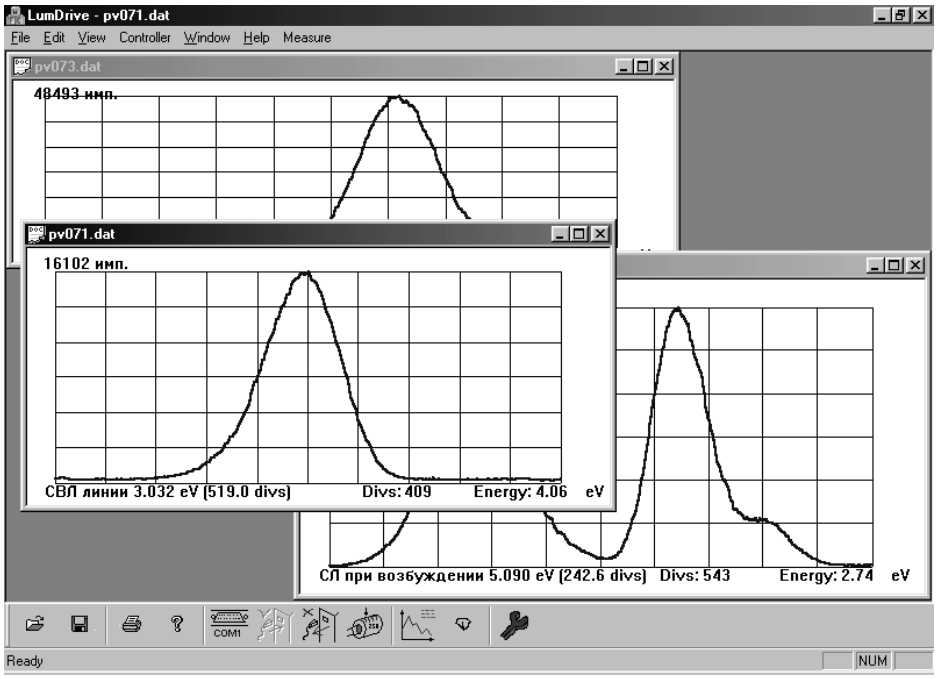


Рисунок 3 – Внешний вид программы LumDrive

Меню Controller содержит инструменты настройки контроллера:

Пункт Port позволяет выбрать COM-порт, к которому подключен контроллер.

Пункты Connect и Disconnect служат для открытия и закрытия порта.

Пункт Motor position позволяет задать начальное положение барабанов монохроматоров.

Меню Measure содержит инструменты проведения измерений:

Пункт Measure tasks вызывает список заданий на измерения. Заполнив требуемые параметры экспериментов, можно создать список спектров, которые необходимо записать, и они будут записаны без дальнейшего вмешательства экспериментатора. Это удобно для проведения серии измерений, хотя можно записывать спектры и по одному.

Пункт Direct Drive активирует режим прямого управления контроллером. В окне Direct Drive непрерывно отображается интенсивность люминесценции на данный момент, и есть средства вращения двигателей, что модно использовать для предварительного сканирования спектра перед измерениями.

Пункт Temperature Measurements вызывает окно записи температурных зависимостей.

Пункт Termometer вызывает окно, в котором отображается текущая температура образца.

Пункт Parameters вызывает окно, в котором задаются различные параметры, как программы, так и установки. Параметры хранятся в системном реестре по адресу HKCU\Software\Solid_State_Physics_lab\LumDrive\Parameters.

Все пункты меню продублированы соответствующими кнопками на панели инструментов внизу экрана.

При старте записи спектра открывается окно документа, в котором отображается система координат и в ней постепенно (по мере записи) вырисовывается уже записанная часть спектра, которая автоматически масштабируется в случае необходимости.

Из основных изменений программы стоит отметить изменение уравнения преобразования напряжения измерительного моста в температуру, что обусловлено увеличением разрядности АЦП нового микроконтроллера относительно старого.

Проведение тестов и контрольных испытаний

В процессе тестирования и последующей эксплуатации установки проведены контрольные измерения, подтвердившие соответствие всех разработанных блоков требованиям технического задания. Работа комплекса была успешно протестирована путём измерения спектров ФЛ и возбуждения ФЛ различных образцов с требуемой воспроизводимостью. Выбор числа шагов определяется необходимым спектральным разрешением, минимальный шаг для монохроматора М1, имеющего нелинейную дисперсию, составляет 0,25 нм/шаг (в области ~250 нм), для М2 – 0,05 нм/шаг в области 550 нм, что достигается применением редуктора, изготовленного на 3D принтере.

В качестве демонстрации работоспособности установки были проведены измерения спектров люминесценции (СЛ) и возбуждения люминесценции (СВЛ), а также термозависимости люминесценции (ТЗЛ) для образца $Gd_xY_{2.97-x}Ce_{0.03}Al_2Ga_3O_{12}$ (x=1.19) при комнатной температуре и температуре жидкого азота, все они представлены на рисунке 4.

Как видно из рисунка 4, зависимость люминесценции от температуры монотонно возрастает от температуры 100 К до 300 К, а затем начинает постепенно падать. Спектр люминесценции представляет из себя широкую полосу на 2,2 эВ, которая при понижении температуры до 100 К расщепляется на две полосы с разной интенсивностью. Спектр возбуждения люминесценции имеет одинаковую форму при любой температуре и представляет из себя две полосы на 2,6 и 3,6 эВ,

которые различаются интенсивностью. Все результаты такие как температура, интенсивность и энергия были получены только при помощи аппаратнопрограммного комплекса.

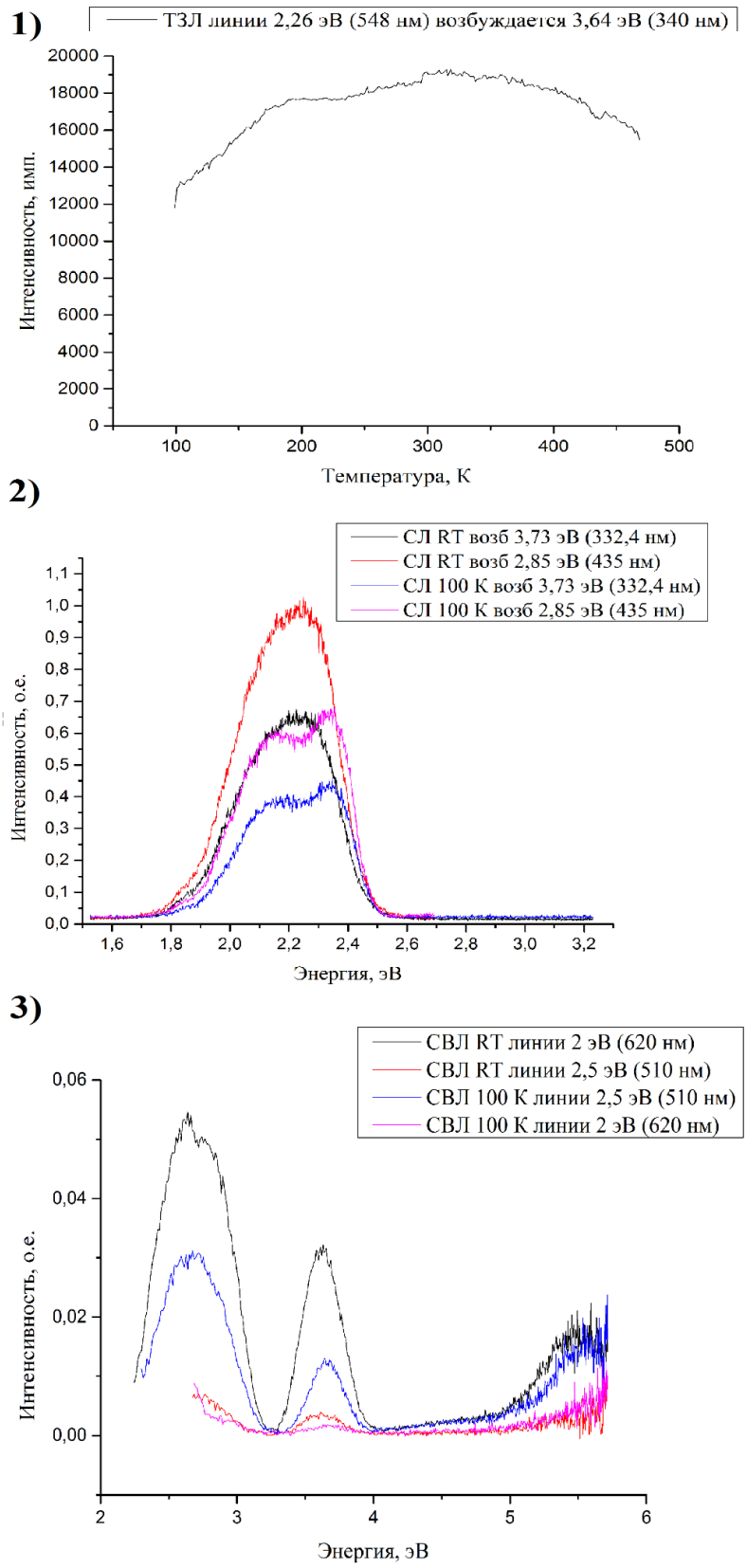


Рисунок 4 – результаты, полученные при помощи нового АПК

Заключение

Кроме научной работы на данной установке проводится лабораторный практикум по курсу физики твёрдого тела. Работа установка была проверена при проведении этого практикума в «жестком режиме эксплуатации»: порядка 10 бригад студентов в неделю в течение 4 недель. Лабораторный практикум подразумевает запись студентами большого числа спектров с разными параметрами. В ходе практикума с применением модернизированного оборудования установка работала стабильно, без сбоев, что подтвердило достаточную степень помехозащищённости линий связи и надёжность изготовленного оборудования.

В результате работы были решены следующие задачи:

– практически полностью изменена элементная база АПК на более новую, что позволило: уменьшить электрическую потребляемую мощность шаговых двигателей, устранить тем самым перегрев блока управления, повысить надежность работы оборудования;

– изменена программа LumDrive для работы с новым АПК;

– разработан полный комплект технической документации на все разработанные устройства: электрическая принципиальная схема АПК, файлы с исходными кодами программы и МК, перечень используемых элементов и данные по ним;

– проведены контрольные тестовые измерения в разных режимах, подтвердившие соответствие всех разработанных блоков АПК требованиям технического задания.

Библиографический список

1. Рентюк В. Шаговые двигатели и особенности их применения / В. Рентюк // Компоненты и технологии. – 2013. – № 10. – С. 71–78.
2. A4988 Carrier Datasheet // Robotshop. – URL: https://www.robotshop.com/media/files/pdf/datasheet-1182.pdf (date of access: 23.09.2021).
3. STM32F100RBT6B Reference Manual // STM. – URL: https://www.st.com/resource/en/reference_manual/cd00246267-stm32f100xx-advanced-arm-based-32-bit-mcus-stmicroelectronics.pdf (date of access: 12.07.2021).
4. Пустоваров В. А. Люминесценция твёрдых тел : учеб. пособие / В. А. Пустоваров. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 128 с. – URL: http://elar.urfu.ru/handle/10995/48987 (дата обращения: 12.05.2021).
5. Горшков Б. Л. Семинар Analog Devices. Методы практического конструирования при нормировании сигналов с датчиков / Б. Л. Горшков, В. И. Силантьев. – Москва : АВТЕКС, 1999 – 311 с.

УДК 006.032

Макарова И.Е., Спиридонов Д.М.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТАРОЙ И НОВОЙ ВЕРСИЙ ГОСТ Р ИСО 31000

Аннотация. С 1 марта 2020 года в силу вступила новая редакция ГОСТ Р ИСО 31000-2019 «Менеджмент риска. Принципы и руководство». Новая версия пересматривает принципы менеджмента рисков, делает акцент на лидерство высшего руководства и встраивание риск-менеджмента, начиная с управления организацией. Основной упор на итеративный характер управления рисками. В настоящей работе приведены отличительные черты старой и новой редакций стандарта.

Ключевые слова: риск, менеджмент риска, оценка риска, анализ риска, обработка риска, принципы.

Abstract. On March 1, 2020, a new version of GOST R ISO 31000-2019 «Risk Management has been joined. Principles and Guide» came into force. The new version revises the principles of risk management, focuses on top management leadership and embedding risk management, starting with the management of the organization. The main emphasis on the iterative nature of risk management. This paper provides distinctive features of the old and new standard editions of the standard.

Keywords: risk, risk management, risk assessment, risk analysis, risk processing, principles.

Риск, являясь неотделимой частью экономической, политической, социальной жизни общества неизбежно сопровождает все сферы деятельности и направления любой организации, которая функционирует в условиях рынка. Особенно вредно присутствие и влияние фактора риска на предприятие, уже находящегося в кризисе. В связи с этим главным и непременным критерием нормальной дееспособности современного предприятия является умение высшего руководства, опираясь на строго научную основу прогнозировать, проводить профилактику, рационально контролировать и эффективно управлять рисками. Риск связан с управлением и напрямую зависит от эффективности, обоснованности и своевременности управленческих решений.

С целью систематизировать управление рисками на предприятии вводится система менеджмента риска. История развития стандартизации управления рисками берет свое начало еще с конца XX века.

Ведущую роль среди международных стандартов, касающихся менеджмента риска, играет семейство стандартов серии ISO 31000. В марте 2020 года вступила в силу новая редакция национального стандарта ГОСТ Р 31000 «Менеджмент риска. Принципы и руководство».

Целью данной работы стало рассмотрение принципиальных различий ГОСТ Р ИСО 31000-2010 [1] и ГОСТ Р ИСО 31000-2019 [2]. Ниже приведен сравнительный анализ изменений по разделам.

Введение. В новой версии стандарта стало больше конкретики. Обращено внимание на то, что менеджмент риска является итеративным процессом и помогает организациям в определении стратегии, достижении целей и принятии обоснованных решений. Из данного раздела были исключены возможности, которые дает риск-менеджмент организации. Изъят и список заинтересованных сторон. Также в новой версии стандарта более конструктивно показана взаимосвязь принципов менеджмента риска, инфраструктуры и процессов менеджмента риска, описанных в настоящем стандарте.

Область применения. В настоящем стандарте содержатся руководящие указания по менеджменту рисков, которым подвержены организации. Убрали такие фразы как «…стандарт может использовать любое государственное, частное или общественное предприятие, ассоциация, группа лиц или отдельное лицо»; «…стандарт может применяться к любому типу риска, независимо от его характера, а также того, имеет ли он отрицательные или положительные последствия»; «…стандарт не предназначен для целей сертификации». Также исключили требование учитывать потребности конкретной организации, ее частные цели, ситуацию (контекст), структуру, операции, процессы, функции, проекты, продукты, услуги или активы, а также конкретную практику, принятую в организации при создании и применении планов по риск-менеджменту.

Введен новый раздел Нормативные ссылки, в котором указано что нормативные ссылки отсутствуют.

Термины и определения. Даны ссылки на сайты ИСО и МЭК, по которым можно найти используемые термины и определения. Перечень терминов и определений значительно сокращен. Остались такие ключевые термины как риск, менеджмент риска, причастная (заинтересованная) сторона, источник риска, событие, последствие. Также были добавлены термины управление (риском) и правдоподобность (появления события). Все термины, связанные с контекстом организации, оценкой, контролем и мониторингом риска, убрали.

Принципы. Перечень принципов (рисунок 1), которые должна соблюдать организация при создании структуры и процесса менеджмента риска, также был сокращен. В старой версии стандарта учитывались защита ценности, связь риска с неопределенностью, использование наилучшей доступной информации, такой как исторические данные, опыт, обратная связь от заинтересованных сторон, наблюдения, прогнозы и экспертные оценки. В новой версии эти принципы исключены.

Рисунок 1 – Принципы менеджмента риска

Структура. Общие положения. В основном, по сравнению с прошлой версией стандарта, структура претерпела незначительные изменения. Согласно редакции 2019 года основой структуры менеджмента риска (рисунок 2) является Лидерство и приверженность, она включает в себя такие компоненты как Адаптация, Проектирование и разработка, Внедрение, Оценка эффективности и Улучшение.

Рисунок 2 – Структура

Структура. Лидерство и приверженность. В отличие от версии 2010 года в новой версии стандарта в данном разделе прописаны не только обязанности высшего руководства, но и преимущества внедрения всех компонентов структуры менеджмента риска, а также требования надзорных органов к организации в данном процессе.

Структура. Адаптация. Этот раздел совершенно новый. Он говорит о том, что адаптация менеджмента риска основана на понимании организационной структуры и среды. Для этого организации нужно определить цели и задачи своей деятельность, распределить ответственность за менеджмент риска, а также учитывать потребности и культуру организации. Менеджмент риска должен быть частью всех процессов в организации, а не отдельным элементом.

Структура. Проектирование и разработка. Понимание организации и ее среды. Особых изменений данный раздел не претерпел. В изучение внешней среды были добавлены такие аспекты как договорные отношения и обязательства, и сложность существующих связей и зависимостей от внешних причастных сторон. В изучение внутренней среды – видение, миссия и ценности.

Структура. Проектирование и разработка. Демонстрация приверженности менеджменту риска. В редакции 2010 года этот раздел назывался Установление политики менеджмента риска и в нем было рассмотрено что должна в себя включать эта политика. Новая редакция стандарта более широко рассматривает обязательства высшего руководства для демонстрации приверженности к менеджменту риска.

Структура. Проектирование и разработка. Определение организационных ролей, полномочий, обязанностей и ответственности. В старой версии стандарта этот раздел имел название Ответственность. Он говорил о том, что должны быть установлены владельцы рисков; лица, ответственные за разработку, внедрение и поддержание инфраструктуры риск-менеджмента; другие виды ответственности на всех уровнях в организации; процессы измерения результативности и процессов отчетности, а также должны быть обеспечены соответствующие уровни признания. Новая же версия предусматривает только определение владельцев рисков и делает упор на то, что менеджмент риска является одной из основополагающих обязанностей.

Из новой версии стандарта был исключен раздел Интеграция в организационные процессы.

Структура. Проектирование и разработка. Распределение ресурсов. Данный раздел практически не изменился, был исключен пункт о ресурсах, необходимых для каждого этапа процесса риск-менеджмента.

Структура. Проектирование и разработка. Установление механизмов обмена информацией и консультирования. В данном разделе объединили два

раздела Установление внутренних механизмов обмена информацией и отчетности, и Установление внешних механизмов обмена информацией и отчетности. В общем этот раздел говорит о том, что организация должна разработать подход к обмену информацией и консультированию. Он подразумевает доведение необходимой информации до целевой аудитории и получение обратной связи, а также ее учет при принятии решений.

Структура. Внедрение. Данный раздел перестроен. Согласно новой версии стандарта организация должна разработать план внедрения менеджмента риска, который должен включать в себя сроки и необходимые ресурсы; определить где, когда и кем будут приниматься различные решения и, при необходимости, изменить процесс принятия решений; обеспечить понимание и практическую реализацию механизмов управления рисками. Для успешного внедрения менеджмента риска необходимо участие заинтересованных сторон. Все это сможет гарантировать, что процесс менеджмента риска будет являться частью всей деятельности организации и все изменения во внешней и внутренней среде будут адекватно учитываться.

Структура. Оценка эффективности. Этот раздел новый и заменяет собой раздел Мониторинг и пересмотр инфраструктуры менеджмента риска. Для оценки эффективности организация должна периодически оценивать эффективность работы структуры менеджмента риска по отношению к целям, планам реализации, показателям и ожидаемому поведению; проверять содействует ли менеджмент риска достижению целей организации.

Структура. Улучшение. В данном разделе существенно ничего не поменялось. Он заключается в том, что, основываясь на результатах мониторинга, необходим постоянно улучшать инфраструктуру риск-менеджмента, политику и план по риск-менеджменту. Это должно приводить к развитию менеджмента риска в организации и повышению ее ценности.

Процесс. Общие положения. В основном процесс осуществления менеджмента риска не поменялся (рисунок 3). Он предполагает «…систематическое применение политик, процедур и действий по обмену информацией и консультированию, определению среды, а также по оценке, обработке риска, мониторингу, пересмотру, документированию рисков и подготовки отчетности». Несмотря на то, что этот процесс представляется последовательным, на практике он является итеративным. Он должен быть неотъемлемой частью управления и принятия решений и интегрироваться во все процессы организации.

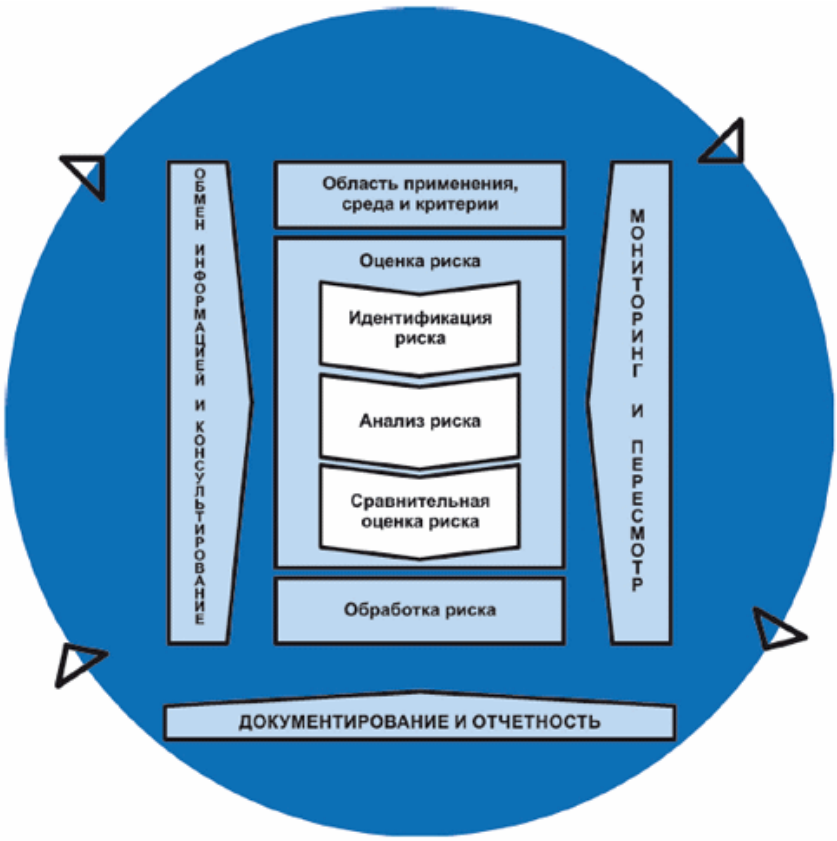


Рисунок 3 – Процесс менеджмента риска

Процесс. Обмен информацией и консультирование. В новой редакции стандарта данный раздел был сокращен. В нем описываются цели обмена информацией и консультирования заинтересованных сторон. Главной целью является «…оказание помощи причастным сторонам в понимании риска, его предпосылок, на основании которых принимаются решения, и причин, в отношении которых требуются конкретные действия». Обмен информацией должен быть направлен на повышение осведомленности о менеджменте риска, а консультирование на получение обратной связи для поддержания процесса принятия решений. Связь этих двух процессов должна способствовать движению информации в организации.

Процесс. Область применения, среда и критерии. Определение области применения. Этот раздел совершенно новый. Целью является адаптация процесса менеджмента риска, позволяющая эффективно оценивать риск и подбирать соответствующие методы обработки риска. Чтобы определить область применения важно четко понимать соответствующие цели, которые необходимо учитывать, а также их согласование с организационными целями, т.к. процесс менеджмента риска может применяться на разных уровнях. При планировании надо учитывать цели, ожидаемые результаты от принимаемых решений, сроки,

местоположение, инструменты и методы оценки рисков, требуемые ресурсы, а также взаимосвязь с другими проектами и процессами.

Процесс. Внешняя и внутренняя среда. Данный раздел также объединил в себе два раздела старой версии стандарта: Установление внешней ситуации и Установление внутренней ситуации. Их содержание было пересмотрено и значительно сокращено. Основная идея в том, что понимание среды важно т.к. менеджмент риска происходит с учетом целей деятельности организации и многие организационные факторы могут стать источником риска, а также цель и область применения процесса менеджмента риска взаимосвязаны с общими целями организации.

Также в новой редакции был исключен раздел Установление ситуации процесса менеджмента риска.

Процесс. Определение критериев риска. Критерии риска должны быть определены для оценки его значимости и поддержания процесса принятия решений. В версии 2019 года требования к критериям риска и факторы, которые необходимо учитывать при их определении, не изменились. Критерии риска должны быть согласованы с политикой управления рисками, отражать ценности, цели и ресурсы организации. Также критерии не являются постоянным параметром, в случае необходимости они должны пересматриваться и корректироваться.

Процесс. Оценка риска. Оценка риска включает в себя идентификацию, анализ и сравнительную оценку риска. Она должна проводиться систематически и итеративно.

Идентификация риска. Целью этого этапа является нахождение и описание рисков, которые могут помочь или помешать организации в достижении ее целей. В данном разделе отдельно обратили внимание на факторы, которые необходимо учитывать при выявлении неопределенностей. К ним отнесли источники риска, причины и события, последствия, угрозы и возможности, уязвимости и способности, изменение среды (внешней и внутренней), характер и стоимость ресурсов, индикаторы риска, достоверность информации, сроки и убеждения заинтересованных лиц.

Анализ риска. Цель заключается в том, чтобы понять природу риска и его характеристики, в том числе, уровень риска. В основном содержание данного раздела не поменялось, но в нем также сделали акцент на факторах, которые необходимо учитывать при анализе риска. Таким образом, для более точных результатов анализа стоит учитывать вероятность событий и последствий, характер и масштабы последствий, сложность и взаимосвязь с другими рисками, волатильность, сроки, эффективность методов управления риском, а также уровень чувствительности и достоверности.

Сравнительная оценка риска. Цель заключается в поддержке принятия решений. Согласно версии 2019 года итогом сравнительной оценки риска может быть одно из решений: не предпринимать никаких мер, рассмотреть варианты обработки риска, провести дальнейший анализ, поддерживать существующие методы управления риском, пересмотреть цели. Все решения должны быть задокументированы, доведены до сведения заинтересованных сторон, а затем подтверждены на соответствующих уровнях организации.

Процесс. Обработка риска. Общие положения. Данный раздел был пересмотрен и сокращен. В новой редакции в нем представлены этапы процесса обработки риска: определение и выбор вариантов обработки риска; планирование и осуществление мероприятий по обработке риска; оценка эффективности такой обработки; принятие решений о приемлемости остаточного уровня риска; если риск неприемлем, осуществление дальнейшей обработки риска. Также в предыдущей редакции были перечислены альтернативные варианты воздействия на риск, в новой версии их исключили.

Процесс. Выбор вариантов обработки риска. Выделено семь вариантов обработки риска. Они не обязательно должны быть взаимоисключающими или подходящими при любых обстоятельствах. Исключена фраза «Если альтернативные варианты воздействия на риск могут влиять на риск где-либо еще в организации или в отношении заинтересованных сторон, то это следует учитывать при принятии решения». Также добавлена фраза «Если отсутствуют доступные варианты обработки риска или если варианты недостаточно эффективны, риск следует задокументировать и держать под постоянным наблюдением».

Процесс. Подготовка и реализация планов обработки риска. Целью реализации планов является обеспечение того, чтобы выбранные варианты обработки риска были реализованы и поняты участвующими сторонами, а также, чтобы осуществлялся мониторинг их выполнения. Исключено требование ознакомления заинтересованных лиц с характером и степенью остаточного риска после воздействия на него.

Процесс. Мониторинг и пересмотр. Данный раздел значительно сокращен. Были исключены цели включения всех аспектов риск-менеджмента в процессы мониторинга и пересмотра.

Процесс. Документирование и отчетность. В предыдущей версии стандарта данный раздел имел название Регистрация процесса менеджмента риска. Данный раздел был перестроен. Регистрация и отчетность направлены на информирование о деятельности по менеджменту риска и ее результатах по всей организации, предоставление информации для принятия решений, совершенствование деятельности по менеджменту риска, содействие в работе с

причастными сторонами. Добавлено требование того, что при принятии решений необходимо учитывать возможность использования информации, ее чувствительность, а также внешнюю и внутреннюю среды. Выделены факторы, которые следует учитывать при формировании отчетности: различия причастных сторон и их специфических потребностей и требований к информации; стоимость, периодичность и своевременность отчетности; форма подготовки и способ предоставления отчетности; соответствие информации организационным целям и принимаемым решениям.

Прошлая версия стандарта содержала Приложение А Признаки улучшенного менеджмента риска. В новой версии приложений нет.

По итогу сравнительного анализа можно сделать вывод, что новая версия стандарта ГОСТ Р ИСО 31000 стала более емкая, а ключевые принципы интеграции в ней стали еще очевиднее. К основным изменениям можно отнести следующие: пересмотр принципов менеджмента рисков, которые являются ключевыми критериями его успеха; акцент на лидерство высшего руководства и встраивание риск-менеджмента, начиная с управления организацией; больший акцент на итеративный характер управления рисками, учитывая, что новый опыт, знания и анализ могут вести к пересмотру составных элементов процесса, задач и средств управления на каждой стадии процесса; оптимизация содержания с большим акцентом на поддержание модели открытых систем.

Библиографический список

1. ГОСТ Р ИСО 31000–2010. Менеджмент риска. Принципы и руководство : введ. 2011–09–01. – Москва : Стандартинформ, 2011. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200089640 (дата обращения: 07.04.2021).
2. ГОСТ Р ИСО 31000–2019. Менеджмент риска. Принципы и руководство : введ. 2020–03–01. – Москва : Стандартинформ, 2020. – URL: http://docs.cntd.ru/document/1200170125 (дата обращения: 07.04.2021).

УДК 547.492

Мартемьянов Н.А., Ильяшенко И.Н., Байнов И.Н.,
Камалов Р.В., Вохминцев А.С., Вайнштейн И.А.

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ТЕРМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НА СТРУКТУРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА g-C_3N_4

Аннотация. Графитоподобный нитрид углерода (g-C_3N_4) был синтезирован термическим прокаливанием карбамида на воздухе при температурах 450–600 °C. Методом рентгеновской дифракции установлено, что с ростом температуры синтеза наблюдается увеличение области когерентного рассеяния, а расстояние между полимеризованными гептазиновыми слоями уменьшается от 3.32 Å до 3.22 Å. Показано, что при температуре синтеза 500 °C молярное соотношение C/N = 0.76 в полученном нитриде углерода близко к стехиометрическому. По результатам спектроскопии диффузного отражения установлено, что образцы g-C_3N_4 поглощают оптическое излучение в области длин волн < 450 нм и имеют ширину запрещенной зоны в диапазоне 2.78-2.83 эВ. При увеличении температуры синтеза наблюдается красный сдвиг максимума фотолюминесценции. Наибольшая интенсивность свечения наблюдается для порошка g-C_3N_4, синтезированного при температуре 550 °C.

Ключевые слова: g-C_3N_4; графитоподобный нитрид углерода; рентгенофазовый анализ; область когерентного рассеяния; фотолюминесценция; диффузное отражение; ширина запрещенной зоны

Annotation. Graphite-like carbon nitride (g-C_3N_4) was synthesized by calcination of urea in the air at temperatures of 450–600 °C. It was found by X-ray diffraction that with an increase in the calcination temperature, the coherent scattering region increases, and the distance between the polymerized heptazine layers decreases from 3.32 Å to 3.22 Å It was shown at temperature of 500 °C the C/N molar ratio in the obtained carbon nitride is close to stoichiometric and equal to 0.76. Based on the diffuse reflectance spectroscopy analysis, g-C_3N_4 powder absorb in the wavelength range <450 nm and have a band gap in the range of 2.78-2.83 eV. With an increase in the calcination temperature, a redshift of the photoluminescence maximum is observed. The highest luminescence intensity is founded for the g-C_3N_4 powder synthesized at the temperature of 550 °C.

Keywords: g-C_3N_4, graphite-like carbon nitride, X-ray diffraction, coherent scattering region, photoluminescence, diffuse reflectance, band gap.

Введение

За последнее десятилетие графитоподобный или полимерный нитрид углерода (g-C_3N_4), неметаллический полупроводник, привлек огромное внимание во многих областях, таких как фотокатализ [1], электрокатализ, органические превращения, зондирование, биоимиджинг и так далее. Это было вызвано основополагающей работой Ванга и др. [2] в 2009 году, с описанием возможности этого соединения расщеплять воду на водород и кислород при облучении светом. Идеальный g-C_3N_4 состоит только из C и N элементов (C_3N_4), со стехиометрическим соотношением 0.75, однако в реальных условиях добиться такого соотношения не

получается, так как в структуре обычно присутствует водород, вследствие неполной полимеризации прекурсоров подобно графиту, объемный g-C_3N_4 имеет слоистую структуру. Окончательная структура объёмного графитоподобного нитрида углерода окончательно не определена, исследователи сходятся во мнении, что каждый слой состоит из три-s-триазиновых (гептазиновых) звеньев, соединенных третичными аминогруппами. Поскольку слои соединены слабыми ван-дер-ваальсовыми силами, они легко отслаиваются многочисленными методами (термическая, ультразвуковая, химическая обработка) получение двумерных листов с большей площадью поверхности и запрещенной зоной по сравнению с таковыми в сыпучем материале. Материал вызывает значительный интерес исследователей благодаря своим увлекательным фотокаталитическим и люминесцентным свойствам в сочетании с простотой его синтеза с использованием в качестве предшественников низкозернистых богатых азотом органических соединений (меламин, цианамид, дициандиамид, карбамид, тиомочевина).

Высокоинтенсивная фотолюминесценция (ФЛ) g-C_3N_4 воспроизводимо наблюдается при комнатной температуре, что обуславливает ее перспективы для светоизлучающих устройств. Положение пика излучения ФЛ g-C_3N_4 зависит от температуры синтеза и может быть настроено по всему видимому спектру [3].

Цель работы – синтез нанопорошков g-C_3N_4 методом термической полимеризации карбамида на воздухе и изучение их характеристик в зависимости от условий синтеза.

Образцы и методика эксперимента

В качестве прекурсора для получения g-C_3N_4 методом термической полимеризации использовали карбамид. 10 г прекурсора помещали в закрытый фарфоровый тигель и нагревали при температурах 450, 500, 550 и 600 °C в муфельной печи в течение 120 мин, а также до 600 °C в течение 30 мин и до 550 °C в течение 180 мин [4]. После процесса синтеза печь остужали до комнатной температуры и вынимали тигель. Полученный образец порошка массой 300 мг имел бледно-желтый цвет.

Полученные структуры были аттестованы методом рентгенофазового анализа с использованием дифрактометра Miniflex 600, Rigaku Corporation, излучение CuKα, диапазон углов 2θ от 10 до 105 градусов с шагом 0.02 °. Морфологические особенности образцов были проанализированы с помощью сканирующего электронного микроскопа Sigma VP, Carl Zeiss. Химический состав образцов был проанализирован с помощью энергодисперсионного спектрометра X-max, Oxford Instruments. Измерение спектров диффузного отражения производилось при комнатной температуре с использованием двухлучевого спектрофотометра Shimadzu UV-2450 и интегрирующей сферы ISR-2200 в

диапазоне 210-850 нм с шагом 0.1 нм. Исследования процессов фотолюминесценции проводились при комнатной температуре на спектрометре LS55, Perkin Elmer в режиме флуоресценции.

Результаты и обсуждение

На основании сопоставления термических эффектов и эффектов потери массы установлено [5], что формирование g-C_3N_4 из карбамида происходит через следующие основные стадии:

I) плавление карбамида (CH_4N_2O) при температуре 137 °C, при котором нет потери массы образца;

II) разложение карбамида до биурета ($C_2H_5N_3O_2$) – активная эндотермическая реакция при температуре 226 °C, сопровождающаяся интенсивной потерей массы;

III) разложение биурета до меламина ($C_3H_6N_6$) – эндотермическая реакция при температуре 234 °C, сопровождающаяся небольшой потерей массы;

IV) разложение меламина до мелама ($C_6H_9N_{11}$) – эндотермическая реакция при температуре 364 °C, сопровождающаяся активной потерей массы при 364 °C;

V) разложение мелама до мелема ($C_6H_6N_{10}$) – низкоинтенсивная эндотермическая реакция при температуре 384 °C с небольшой потерей массы;

VI) разложение мелема до мелона ($C_6H_3N_9$) – эндотермическая реакция при температуре 413 °C с небольшой потерей массы;

VII) полимеризация мелона до графитоподобного нитрида углерода (g-C_3N_4) при температуре 445 °C, сопровождающийся малозаметным эффектом потери массы.

Анализ морфологии и химический состав

Образец представляет собой набор частиц субмикронного размера (Рисунок 1), состоящий из отдельных искривленных слоистых структур. Фрагменты очень хорошо связаны между собой и даже после ультразвуковой обработки перед подготовкой образца к сканирующей электронной микроскопии остаются в виде агломератов частиц с развитой поверхностью. Микроструктуры представленных образцов при температурах синтеза 450 и 500 °C представляют собой сильно изогнутые листовые структуры с нанометровой толщиной отдельного листа при сравнительно небольшом количестве обломков размером меньше 100 нм. Для температур 550 °C и выше количество нанометровых фрагментов увеличивается одновременно с появлением рваных краев отдельных листов, что, предположительно, связано с разложением [6].

Таблица 1 показывает соотношение C/N в зависимости от температуры синтеза, полученное с помощью энергодисперсионного анализа. Ближе всего к стехиометрическому (0.75) получается состав, синтезированный при температуре 500 °C.

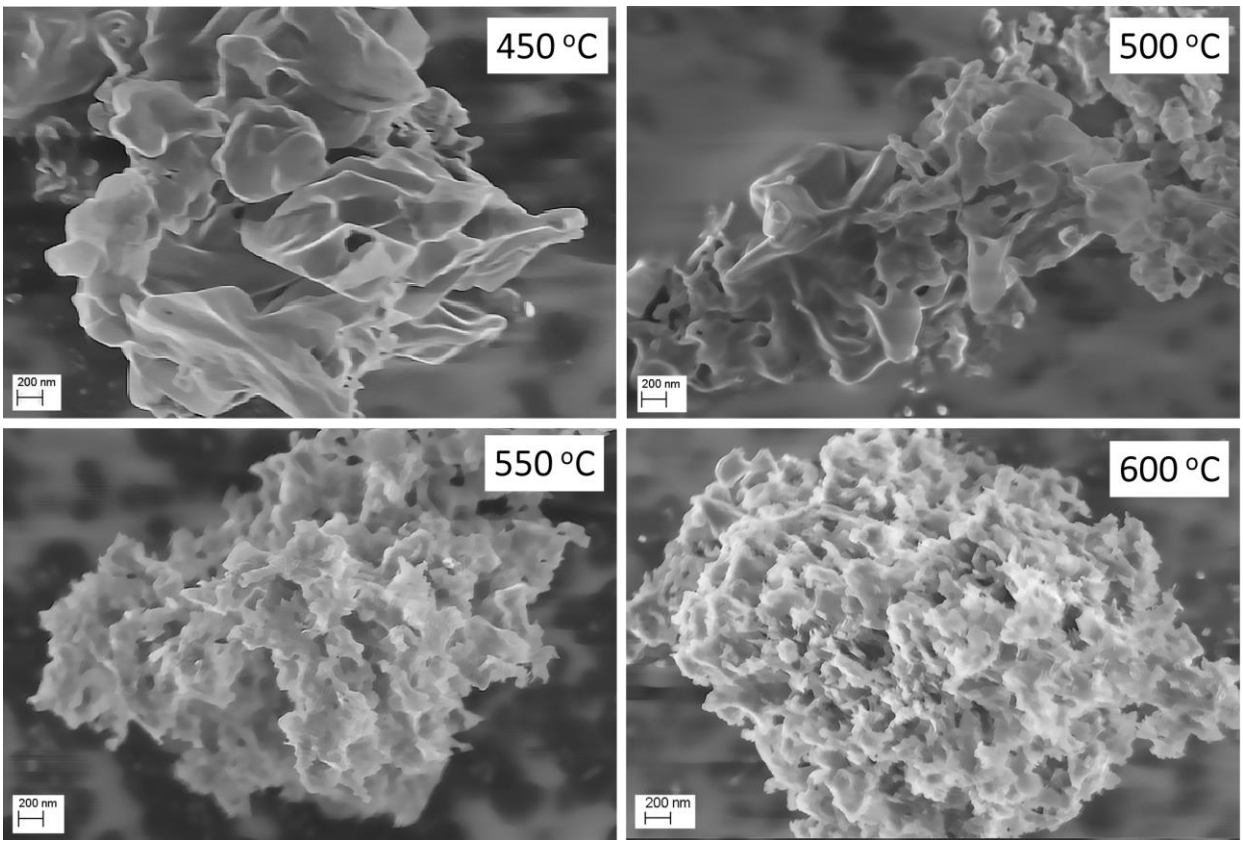


Рисунок 1 – Снимки СЭМ синтезированных образцов g-C_3N_4

Рентгенофазовый анализ

Рентгенограммы образцов синтезированного нитрида углерода, полученных при различных температурах нагрева, показаны на рисунке 2. Все образцы демонстрируют два дифракционных пика, расположенных на 13.25 ° и 27.1 °, которые принадлежат дифракционным плоскостям (210) и (002), соответственно.

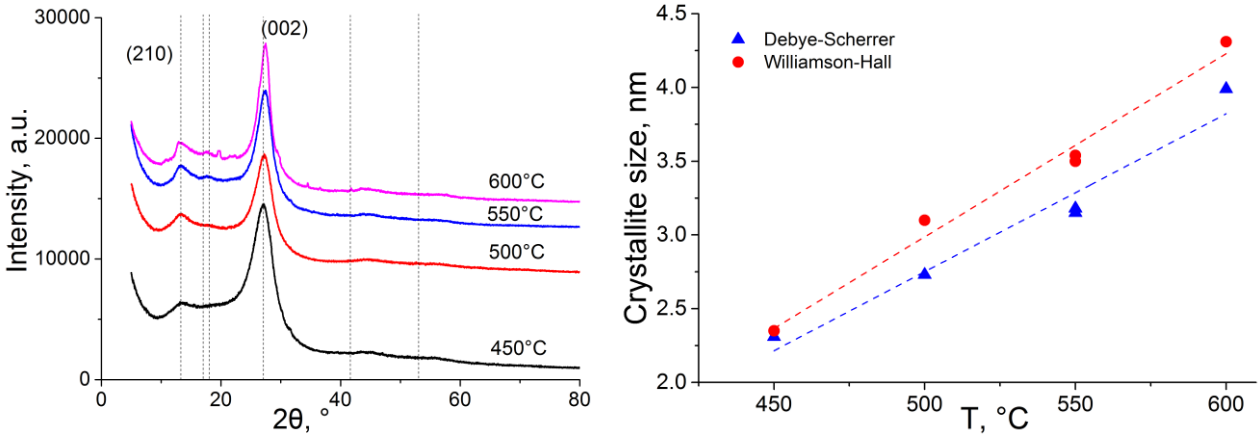


Рисунок 2 – Дифрактограммы образцов и зависимость области когерентного рассеяния от температуры синтеза

Сравнение между экспериментальными пиками и (210) и (002) пиками стандартных материалов g-C_3N_4 показало, что синтезированный g-C_3N_4 кристаллизуется в орторомбической фазе (файл PDF Card No: 00-066-0813 QM: S). Наиболее интенсивный рефлекс (002) соответствует межслойной укладке сопряженной ароматической системы с изменением расстояния между слоями от 3.32 Å до 3.22 Å, что соответствует смещению 2θ от 26.8 до 27.65 град. с увеличением температуры синтеза.

По рентгенограммам были рассчитаны размеры области когерентного рассеяния (ОКР) (Таблица 1). Оценки производились по методам Дебая-Шеррера и Вильямсона-Холла [7]. Для сравнения были взяты данные для порошка g-C_3N_4 [8] (метод определения ОКР не указывается).

Таблица 1 – Размеры ОКР для порошков g-C_3N_4

Температура синтеза, °C	Расчетное значение ОКР, нм		Соотношение C/N
	метод Вильямсона-Холла	метод Дебая-Шеррера	
450	2.35	2.31	0.55
500	3.10	2.73	0.76
550	3.50	3.15	0.68
600	4.31	3.99	0.58
550	11.6 [8]	–	–

Размер ОКР полученных порошков увеличивается с ростом температуры синтеза. Для образцов прослеживается линейная зависимость размера ОКР от температуры синтеза (рисунок 2, справа). При этом полимеризация g-C_3N_4 возрастает, и листы на основе гептазина демонстрируют более плотную пространственную упаковку. Указанная структурная особенность приводит к усилению структурных связей за счет усиления Ван дер Ваальсового взаимодействия между блоками гептазина [9].

Вне зависимости от типа прекурсора при росте температуры происходит разложение исходного материала с образованием меламина. G-C_3N_4 – это структура, образованная конденсацией твердых материалов одиночными молекулами меламина, и чем выше температура, тем в конечном продукте будет больше количество гептазиновых колец и образуется более плотная упаковка ароматических кластеров sp^2 [10]. По мере повышения температуры обработки полимерная сеть g-C_3N_4 может расширяться за счет соединения большего количества гептазина, а длина связи кластеров sp^2 C-N увеличивается с ростом температуры [11]. Следовательно, более сильное перекрытие орбиталей приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны g-C_3N_4.

Оценка ширины запрещённой зоны

Спектры диффузного отражения, измеренные при комнатной температуре, были проанализированы с использованием функции Кубелки-Мунка F(R) [12]:

$$\alpha \sim F(R) = \frac{(1-R)^2}{2R} \quad (1)$$

где R – коэффициент отражения; α – показатель поглощения, см$^{-1}$. Полученные спектры оптического поглощения представлены на рисунке 3(а). Для всех графиков характерен резкий рост поглощения при hν <2.75 эВ (450 нм), что соответствует области края поглощения для графитоподобного нитрида углерода. Наиболее сильное отражение наблюдается в образце с температурой синтеза 550 °C.

Оценка ширины запрещенной зоны E_g проводилась с использованием подхода Тауца [13, 14, 15]:

$$\alpha h\upsilon = B\left(h\upsilon - E_g\right)^n, \quad (2)$$

где $h\nu$ – энергия фотонов, B – размерная константа, n – постоянная, которая зависит от типа межзонного перехода. Известно, что структуры g-C_3N_4 характеризуются непрямыми межзонным переходами с n = 2. На рисунке 3(б) показано построение Тауца для всех синтезированных образцов. Отметим, что уменьшение длины связи между слоями приводит к более сильному перекрытию молекулярных орбиталей ароматических листов, что может проявиться в сужении запрещенной зоны нитрида углерода [16]. В настоящей работе установлено, что величина энергетической щели для структур g-C_3N_4 лежит в диапазоне E_g = 2.83 – 2.78 эВ.

Для исследования люминесцентных свойств образцов g-C_3N_4 был исследован спектр возбуждения. На спектре были обнаружены два максимума с длинами волн 275 нм и 380 нм. Исследования производились с длиной волны 380 нм в связи с максимальной интенсивностью люминесценции.

Спектры фотолюминесценции, см. рис. 3(в), демонстрируют смещение максимумов в сторону меньших энергий без изменения ширины полосы свечения. Форма спектров при этом не меняется и предполагает наличие нескольких излучающих процессов [16]. Основной структурой g-C_3N_4 является кольцевая структура гептазина, которая соединена атомами N с образованием полимерной сети. Считается [17, 18], что на люминесцентные свойства материалов из нитрида углерода в основном влияет размер кластеров sp^2 C-N и одиночных парных электронов нитрида.

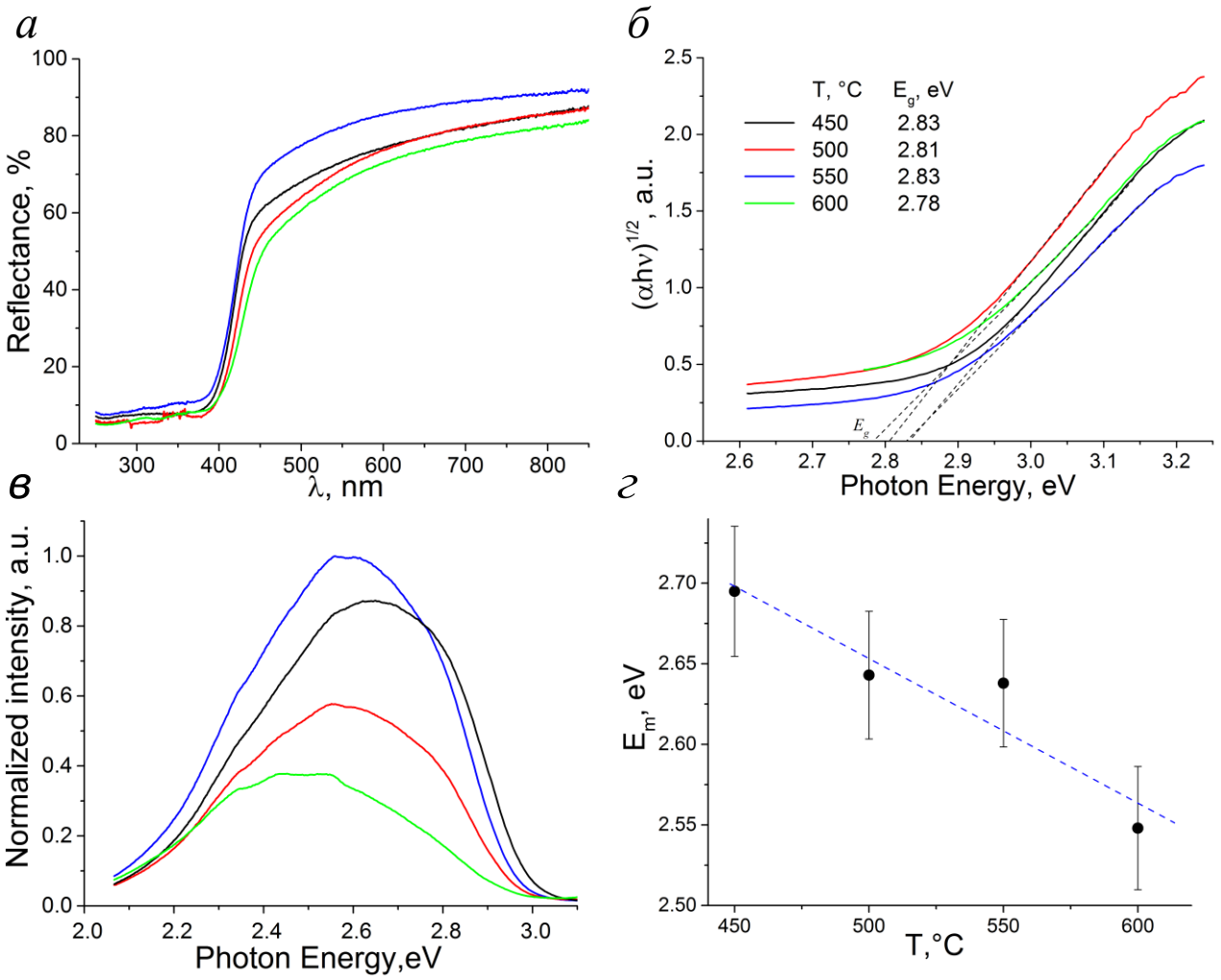


Рисунок 3 – Оптические свойства g-C_3N_4: а) спектры диффузного отражения; б) построение Тауца для непрямых переходов; в) спектры фотолюминесценции; г) зависимость энергии переходов от температуры синтеза.

Заключение

В результате прокаливания карбамида на воздухе при температурах от 450 °C до 600 °C в течение 120 минут был синтезирован графитоподобный нитрид углерода g-C_3N_4, что подтверждается результатами рентгенофазового анализа. При увеличении температуры синтеза расстояние между полимеризованными гептазиновыми слоями в плоскости (002) уменьшается от 3.32 Å до 3.22 Å. Область когерентного рассеяния увеличивается с ростом температуры синтеза. Ближе всего стехиометрическому составу соответствует структура, которая синтезирована при 500 °C и характеризуемся соотношением C/N = 0.76. Методом диффузного отражения проанализированы оптические спектры в области края собственного поглощения при λ <450 нм.

Экстраполяция линейных участков спектров оптического поглощения в координатах Тауца позволила оценить ширину запрещенной зоны с учетом

разрешенных непрямых переходов, которая для всех полученных образцов лежит в диапазоне 2.78 – 2.83 эВ. Измеренные спектры фотолюминесценции имеют максимумы в области 460-480 нм, которые демонстрируют красное смещение и уменьшение интенсивности свечения с ростом температуры синтеза полимеризованных структур графитоподобного нитрида углерода.

Библиографический список

1. Synthesis of graphitic carbon nitride-based photocatalysts for hydrogen evolution under visible light / A. V. Zhurenok, T. Larina, D. Markovskaya [et al.]. – DOI 10.1016/j.mencom.2021.03.004 // Mendeleev Communications. – 2021. – Vol. 31. – P. 157–159.
2. Polymer semiconductors for artificial photosynthesis: hydrogen evolutionby mesoporous graphitic carbon nitride with visible light / X. Wang, K. Maeda, X. Chen [et al.] // Journal of the American Chemical Society. – 2009. – Vol. 31, Iss. 5. – P. 1680–1681.
3. A review on g-C_3N_4 – based photocatalysts / J. Wen, J. Xie, X. Chen, X. Li. – DOI 10.1016/j.apsusc.2016.07.030 // Applied Surface Science. – 2017. – Vol. 391. – P. 72–123.
4. Review on fabrication of graphitic carbon nitride based efficient nanocomposites for photodegradation of aqueous phase organic pollutants / A. Sudhaik, P. Raizada, P. Shandilya [et al.]. – DOI 10.1016/j.jiec.2018.07.007 // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2018. – Vol. 67, Iss. 6. – P. 28–51.
5. Thermal decomposition (pyrolysis) of urea in an open reaction vessel / P. Schaber, J. Colson, S. Higgins [et al.]. – DOI 10.1016/j.tca.2004.05.018 // Thermochimica Acta. – 2004. – Vol. 424, № 1/2. – P. 131–142.
6. Polycondensation of thiourea into carbon nitride semiconductors as visible light photocatalysts / G. Zhang, J. Zhang, M. Zhang, X. Wang. – DOI 10.1039/c2jm00097k // Journal of Materials Chemistry. – 2012. – Vol. 22. – P. 8083.
7. Nath D. X-ray diffraction analysis by Williamson-Hall, Halder-Wagner and size-strain plot methods of CdSe nanoparticles – a comparative study / D. Nath, F. Singh, R. Das // Materials Chemistry and Physics. – 2020. – Vol. 239. – P. 122021.
8. NiO-decorated graphitic carbon nitride toward electrocatalytic hydrogen production from ethanol / M. I. Chebanenko, A. A. Lobinsky, V. N. Nevedomskiy, V. I. Popkov// Dalton Transactions. – 2020. – Vol. 49. – P. 12088–12097.
9. Immobilization of polymeric g-C_3N_4 on structured ceramic foam for efficient visible light photocatalytic air purification with real indoor illumination / F. Dong, Zh. Wang, Yu. Li [et al.]. – DOI 10.1021/es502290f // Environmental Science & Technology. – 2014. – Vol. 48, Iss. 17. – P. 10345−10353.
10. Synthesis of bulk and nanoporous carbon nitride polymers from ammonium thiocyanate for photocatalytic hydrogen evolution / Y. Cui, J. Zhang, G. Zhang [et al.]. − DOI 10.1039/c1jm11961c // Journal of Materials Chemistry. – 2011. – Vol. 21. – P. 13032−13039.
11. Bond contraction and lone pair interaction at nitride surfaces / C. Q. Sun, B. K. Tay, S. P. Lau [et al.]. − DOI 10.1063/1.1390305 // Journal of Applied Physics. – 2001. – Vol.

90, Iss. 5. – P. 2615–2617.
12. Kubelka P. Ein eitrag zur optik der farban striche / P. Kubelka, F. Munk // Zeitschrift fur Technische Physik. – 1931. – Vol. 11. – P. 593–601.
13. Tauc J. Amorphous and Liquid Semiconductors / J. Tauc. – Boston: Springer. – 1974. – 220 p.
14. Energy gap evaluation in microcrystalline m-HfO_2 powder / A. O. Shilov, S. S. Savchenko, A. S. Vokhmintsev [et al.]. – DOI 10.17516/1997-1397-2021-14-2-1-6 // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. – 2021. – Vol. 14, Iss. 2. – P. 224–229.
15. Optical absorption edge parameters of zirconiumdioxide nanotubular structures / A. V. Kozhevina, A. S. Vokhmintsev, R. V. Kamalov [et al.]. – DOI 10.1088/1742-6596/917/6/062031 // Journal of Physics Conference Series. – 2017. – Vol. 917. – P. 062031.
16. Synthesis and luminescence mechanism of multicolor-emitting g-C_3N_4 nanopowders by low temperature thermal condensation of melamine / Y. Zhang, Q. Pan, G. Chai [et al.]. – DOI 10.1038/srep01943 // Scientific Reports. – 2013. – Vol. 3, Iss. 1. – P. 1943.
17. The effect of temperature on the mechanism of photoluminescence from plasma-nucleated, nitrogenated carbon nanotips / B. B. Wang, Q. J. Cheng, L. Wang [et al.] // Carbon. – 2012. – Vol. 50, Iss. 10. – P. 3561–3571.
18. Study of amorphous carbon nitride films aiming at white light emitting devices / Y. Iwano, T. Kittaka, H. Tabuchi [et al.]. – DOI 10.1143/JJAP.47.7842 // Japanese Journal of Applied Physics. – 2008. – Vol. 47, Iss. 10. – P. 7842–7844.

УДК 621.311.62

Миронов А.А., Хохлов К.О.

БЛОК ПИТАНИЯ ДЛЯ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОСПИННИНГА

Аннотация. Разработан высоковольтный источник питания для электроспиннинга. Устройство допускает постоянное напряжение до 30 кВ с коэффициентом пульсации менее 0,1%. Предполагаемое использование – электроспиннинг сенсорных материалов, содержащих флуоресцентные красители и наночастицы.

Ключевые слова: электроспиннинг, электропрядение, электроформование, нановолокна, высокое напряжение.

Abstract. The high voltage power supply for application in the electospinning was developed. The device allows constant voltage up to 30 kV with pulsation coefficient below 0,1 %. The intended use is electrospinning of sensory materials containing fluorescent dyes and nanoparticles.

Keywords: electrospinning, electrospun, nanofibers, high voltage.

Введение

Электроспиннинг – метод получения полимерных нитей, волокон диаметром десятки нанометров из раствора в высоковольтном электрическом поле. Капля раствора под действием электростатических сил деформируется в конус, из кончика которого вытягивается нить и направляется на коллектор. Электроспиннинг долгое время привлекает внимание ученых в пору особого интереса к нанотехнологиям и обладает большими перспективами развития, универсальностью и возможностью применения в различных отраслях.

Полученные волокна различного состава применяются для фильтрации газов и жидкостей, в фотонных и электрических преобразователях энергии, как полимерные каркасы для размещения сенсорных и терапевтических веществ.

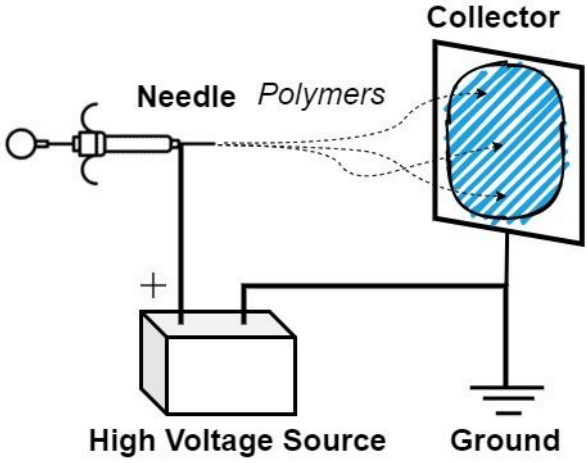


Рисунок 1 – Структурная схема установки электроспиннинга

Развитие данного метода привело к созданию различных установок, классическая структура которых приведена на рисунке 1. Также существуют электроспиннинги с несколькими иглами, промышленные образцы способные вырабатывать нановолокна в больших объемах, электроспиннинги с подводом на иглу нескольких действующих веществ, которые объединяются в волокно под действием электростатических сил, и электроспиннинги с линейными электродами.

Статическое постоянное высокое напряжение обычно подается на электроды для создания электрического поля. Полярность напряжения может быть как положительной, так и отрицательной, что влияет на распределение заряженных молекул в жидкости и, следовательно, на тип зарядов, накопленных на поверхности струи. Для некоторых материалов, особенно электролитов, их способность к электроспиннингу зависит от полярности приложенного напряжения.

Приложенное напряжение напрямую определяет количество зарядов, переносимых струей, и величину электростатического отталкивания между зарядами, а также силу взаимодействия между струей и внешним электрическим полем. Более высокое напряжение обычно способствует образованию более тонких волокон, тогда как это также может вызвать выброс большего количества жидкости, что приведет к образованию волокон с более толстым диаметром. Переменное напряжение также используется для электропрядения волокон, но поведение струи существенно отличается от поведения при постоянном напряжении.

Наиболее часто используемые материалы – это органические полимеры в форме раствора или расплава. Изменять свойства будущих нановолокон можно путем введения наноразмерных компонентов в раствор или расплав полимера (например наночастиц, нанопорошков, нанотрубок).

Таким образом, для реализации данного метода требуется учесть большое количество параметров: концентрация полимера и соли-прекурсора, вязкость раствора, конфигурация иглы и коллектора, расстояние между ними, стабильное напряжение. Варьирование этих параметров позволяет получать материалы с требуемыми структурой, составом и свойствами. После анализа информации о методе электроспиннинга, принято решенение разработать блок питания на максимальное выходное напряжение 30 кВ с возможностью регулировки, что приведет к реализации метода электроспиннинга на обширной линейке растворов. Одно из основных требований – минимальный коэффициент пульсаций напряжения между электродами.

Образцы и методика эксперимента

В ходе изучения различных источников поставлено конкретное техническое задание: разработать блок питания на максимальное выходное напряжение до 30 кВ для установки электроспиннинга, предусмотреть:

- плавное изменение выходного напряжения путем подачи на инвертор регулируемого напряжения с лабораторного источника питания от 0 до 300 В
- коэффициент пульсаций выходного напряжения менее 0,1 %.

Рассмотрим способы получения высокого стабильного постоянного напряжения.

Существуют линейные и импульсные источники питания. Линейный стабилизатор способен выдавать в нагрузку напряжение только ниже входного напряжения питания и не подходит для выполнения поставленной задачи.

Импульсные блоки питания являются инверторной системой. В импульсных блоках питания переменное входное напряжение сначала выпрямляется. Полученное постоянное напряжение преобразуется в прямоугольные импульсы повышенной частоты и определённой скважности, либо подаваемые на трансформатор (импульсные блоки питания с гальванической развязкой от питающей сети) или напрямую на выходной фильтр нижних частот (импульсные блоки питания без гальванической развязки). В импульсных источниках питания могут применяться малогабаритные трансформаторы – это объясняется тем, что с ростом частоты повышается эффективность работы трансформатора и уменьшаются требования к габаритам (сечению) сердечника, требуемым для передачи эквивалентной мощности. В большинстве случаев такой сердечник может быть выполнен из ферромагнитных материалов, в отличие от сердечников низкочастотных трансформаторов, для которых используется электротехническая сталь.

В импульсных блоках питания стабилизация напряжения обеспечивается посредством отрицательной обратной связи. Обратная связь позволяет поддерживать выходное напряжение на относительно постоянном уровне вне зависимости от колебаний входного напряжения и величины нагрузки.

Важной характеристикой источников питания является гальваническая развязка. При проектировании импульсных источников на напряжения более 300 В гальваническая развязка рекомендуема, а в целях безопасности установки – обязательна. Таким образом, требуется использовать схему источника высокого напряжения с гальванической развязкой.

Основные типы импульсных источников питания с использованием гальванической развязки приведены в таблице 1 с примерным диапазоном мощностей и сложностью для каждого из типов преобразователей.

Таблица 1 – Импульсные преобразователи с гальванической развязкой

Схема	Диапазон мощностей	Относительная сложность
Обратноходовая	1…100 Вт	Низкая
Прямоходовая	1…200 Вт	Средняя
Двухтактная	200…500 Вт	Средняя
Полумостовая	200…500 Вт	Высокая
Мостовая	500…2000 Вт	Очень высокая

Во всех типах данных преобразователей используются импульсные трансформаторы кроме обратноходовой, где применяется дроссель с двумя обмотками противоположной фазировки.

При выборе полумостового импульсного преобразователя можно получить двухполярное выходное напряжение, что расширит спектр применения данного блока питания для получения нановолокон из различных растворов полимеров. Двухполярное выходное напряжение образуется за счет поочередного замыкания ключей, что приводит к формированию на первичной обмотке трансформатора двухполярного переменного напряжения. Подключив схему двуканального умножителя напряжения к вторичной обмотке импульсного трансформатора, можно окончательно увеличить величину выходного напряжения.

Выбор структурных элементов блока питания:

- инвертор – преобразует постоянное напряжение с лабораторного источника питания в переменное напряжение прямоугольной формы с требуемой частотой для дальнейшего преобразования;
- разделительный трансформатор – позволяет развязать потенциал инвертора и повышающую часть блока питания;
- повышающий трансформатор;
- умножитель напряжения – выпрямитель с повышением выходного напряжения;
- фильтрующий элемент для снижения коэффициента пульсаций.

Следующий этап проектирования – разработка электрической принципиальной схемы (рисунок 2) и выбор компонентов, согласно структурной схеме.

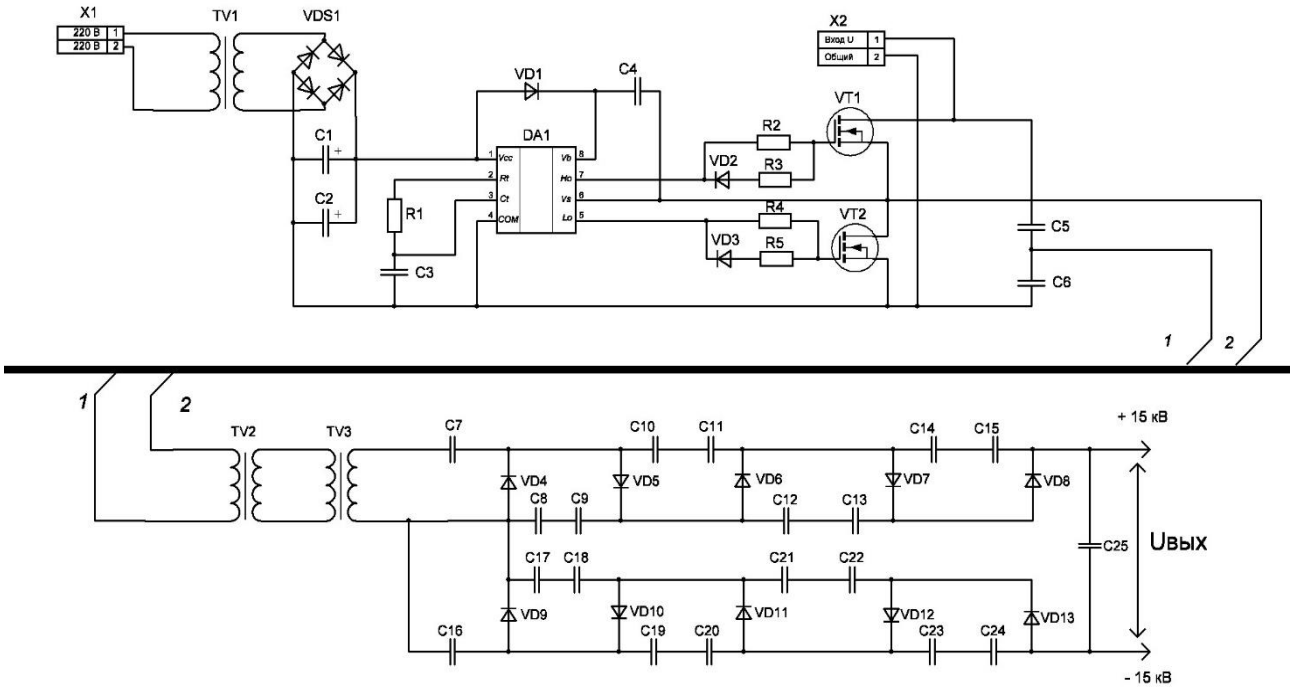


Рисунок 2 – Принципиальная электрическая схема блока питания установки электроспиннинга

Результаты и обсуждение

На данный момент блок питания функционирует согласно требованиям, однако при сборке, несмотря на предварительные расчеты, возникали некоторые трудности, которые нужно обсудить подробнее:

1) Эффект появления сквозных токов через транзисторы VT1 и VT2, что может привести к сильному нагреву и выходу из строя полупроводниковых элементов.
2) Изоляция импульсного повышающего трансформатора
3) Изоляция платы с умножителем напряжения.

Рассмотрим решения данных проблем подробнее.

Наличие сквозных токов в схеме полумостового инвертора обусловлено моментом времени, когда один из транзисторов уже открылся, а второй не успел закрыться. Чтобы обеспечить переключение транзисторов, полумостовой драйвер IR2153 имеет «мертвое» время 1,2 мкс, которого может оказаться недостаточно. Для решения данной проблемы было предпринято несколько шагов.

Первый шаг- использовать особенность драйвера и обеспечить разные токи заряда/разряда затворов силовых транзисторов с помощью параллельно включенных резисторов и диодов VD2 и R3, VD3 и R5.

Второй шаг – выбрать современные транзисторы с улучшенными динамическими характеристиками. Первоначально были установлены силовые ключи на транзисторах IRF740, которые в последствие заменены на STP4NK60ZFP. Сравнительные характеристики транзисторов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение динамических характеристик конкурирующих транзисторов

Параметр		IRF740	STP4NK60ZFP
$t_{d(on)}$, нс	Время задержки включения	14	12
$t_{r)}$, нс	Время фронта	27	9,5
$t_{d(off)}$, нс	Время задержки выключения	50	29
$t_{f)}$, нс	Время спада	24	16,5
C_{iss}, пФ	Входная емкость	1400	510
C_{oss}, пФ	Выходная емкость	330	67

Повышающий импульсный и разделительный трансформаторы изготовлены вручную и являются специализированным изделием. Формфактор магнитопровода Б44 с ферритом НМ2000. Рассчитаны основные параметры трансформатора, требуемый коэффициент трансформации – 20. Количество витков первичной обмотки – 31, вторичной – 620. Амплитуда входного напряжения равна 150 В, на выходе переменное с амплитудой 3 кВ. Проблема изоляции решается с помощью электроизоляционного компаунда, которым заливается весь каркас с обмотками.

Чтобы избежать влияния высоковольтной части схемы на импульсную и усилить гальваническую развязку принято решение использовать согласующий (развязывающий) трансформатор с коэффициентом трансформации равным 1. Это также следует сделать по причине того, что при подключении выходов УН к электродам установки электроспиннинга, на вторичной обмотке относительно первичной формируется разность потенциалов порядка 15 кВ. Медная обмотка развязывающего трансформатора помещена в дополнительную изоляцию.

Для получения выходного напряжения в 30 кВ применяется двуканальный умножитель напряжения.

Умножитель напряжения решено расположить на печатной плате. Из-за простоты требуемых контактных площадок и несложности соединений на плате

она изготовлена вручную методом травления. На плате предусмотрен вырез между плечами каналов УН с целью избежать пробой по поверхности платы. Фильтрующий конденсатор на выходе УН поднят над платой, так как при получении на выходе напряжения более 18 кВ по его корпусу, прилегающему к плате, начиналась утечка.

Важно отметить, что выбранные конденсаторы, накапливающие энергию в звене умножителя, имеют максимальное напряжение между обкладками 3 кВ и достаточно большой допуск по емкости +80% -20%. Во время работы УН на конденсаторах напряжение может достигать 6 кВ, по этой причине конденсаторы включены последовательно. При этом важно, чтобы емкости конденсаторов в паре отличались как можно меньше. Пары конденсаторов в каждом звене умножителя выбраны исходя из близкого значения измеренной емкости. Для дополнительной электроизоляции корпуса конденсаторов помещены в термоусадочную трубку.

Внешний вид конструкции приведен на рисунке 3.

Заключение

Спроектированный и собранный блок питания позволит расширить возможности лаборатории, откроет дорогу новым исследованиям.

Основные результаты работы:

– разработан и собран блок питания на расчетное максимальное выходное напряжение 30 кВ;

– применена схема полумостового инвертора на специализированном драйвере IR2153;

– для дополнительной гальванической развязки вторичной обмотки повышающего трансформатора применен согласующий трансформатор;

– использована схема двухканального умножителя напряжения, что позволит применять данный блок питания для экспериментов как с положительной, так и с отрицательной полярностью выходного напряжения;

– проверена работа блока питания на практике, измерен коэффициент пульсаций, который имеет значение 0,03 %;

– получены первые образцы микро- и нано- волокон из растворенных полимеров.

Перспективы:

– разработка цепи обратной связи для стабилизации выходного напряжения и подключения к модулю индикации;

– использование, в качестве входного напряжения инвертора, выпрямленного напряжения сети, с возможностью регулировки выходного напряжения блока питания.

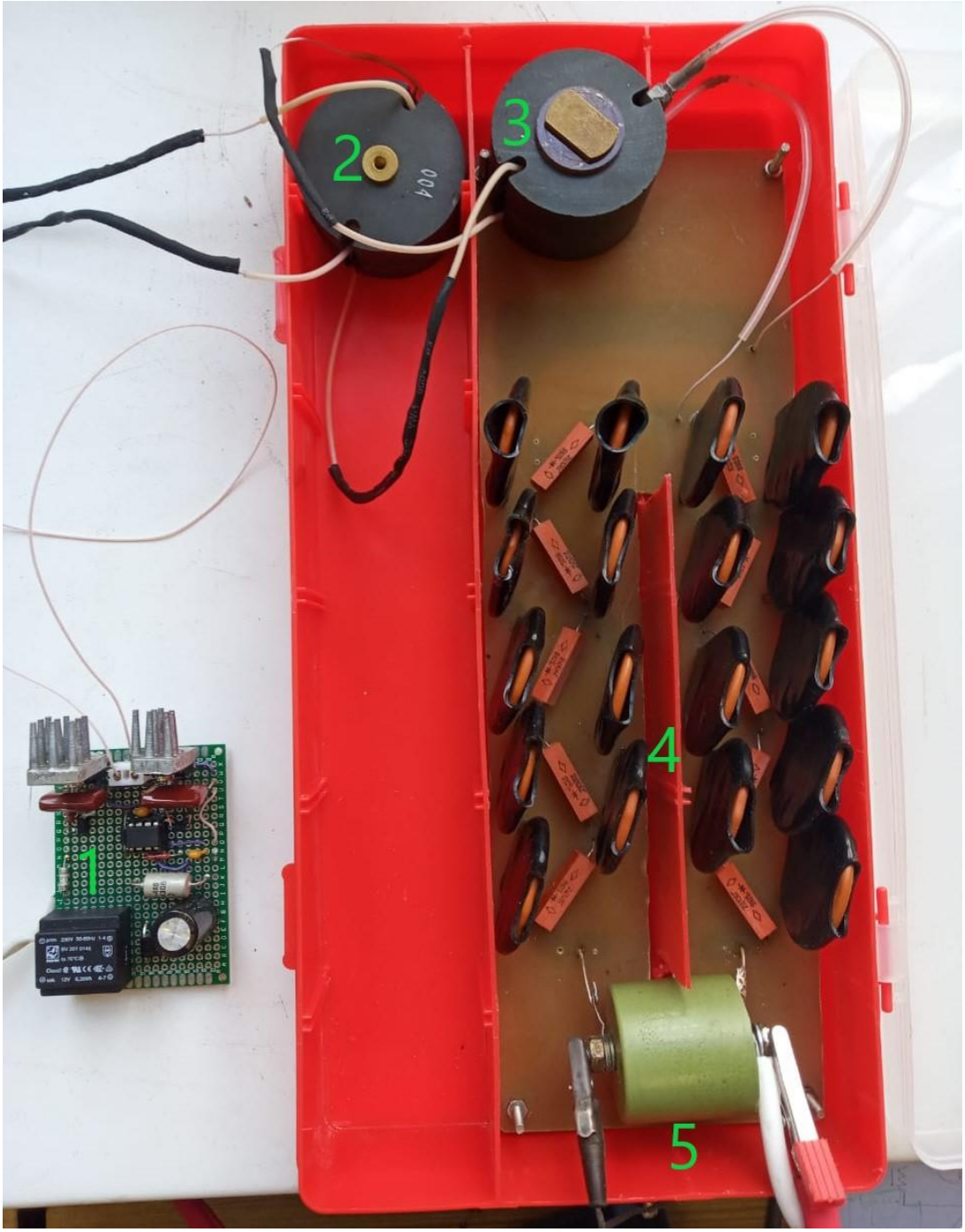


Рисунок 3 – Блок питания для установки электроспиннинга. 1 – полумостовой инвертор, 2 – согласующий трансформатор, 3 – повышающий импульсный трансформатор, 4 –двуканальным умножителем напряжения, 5 – выходной фильтр.

Библиографический список

1. Electrospinning and Eltctrospun Nanofibers: Methods, Materials and Applications / Jiajia Xue, T. Wu, Y. Day, Y. Xia // Chemical Reviews. – 2019. – Vol. 119, Iss. 8. – P. 5298–5415.
2. Prabu G. T. V. A Novel Profiled Multi-Pin Electrospinning System for Nanofiber Production and Encapsulation of Nanoparticles into Nanofibers / G. T. V. Prabu, B.

Dhurai // Scientific Reports. – 2020. – Vol. 10. – P. 4302.
3. Семенов Б. Ю. Силовая электроника: от простого к сложному / Б. Ю. Семенов. – Москва : СОЛОН-Пресс, 2005. – 416 с.
4. Иванов-Цыганов А. И. Электро-преобразовательные устройства РЭС / А. И. Иванов-Цыганов. – Москва : Высшая школа, 1991. – 272 с.

УДК 37.025-053.4

Молоднякова А.В.

РАЗВИТИЕ ОБЪЕМНО-ПРОСТРАНСТВЕННОГО МЫШЛЕНИЯ ДЕТЕЙ СТАРШЕГО ДОШКОЛЬНОГО ВОЗРАСТА В УСЛОВИЯХ КОМПЬЮТЕРНО-ИГРОВОГО КОМПЛЕКСА «LIGROGAME»

Аннотация. В статье рассматриваются образовательные возможности отечественного решения – компьютерно-игрового комплекса «LigroGame», которое включает программу ЭВМ «электронная среда для 3D моделирования LigroGame» и оригинальные дидактические и учебно-методические пособия для развития математических представлений, объемно-пространственного мышления и навыков компьютерного трехмерного моделирования у детей старшего дошкольного возраста.

Ключевые слова: дошкольное образование, объемно-пространственное мышление, компьютерное 3D моделирование, конструктивно-техническая деятельность, ИКТ-технологии в обучении.

Abstract. The article discusses the educational possibilities of the domestic solution-the computer-game complex «LigroGame», which includes the computer program» electronic environment for 3D modeling LigroGame « and original didactic and teaching aids for the development of mathematical representations, three-dimensional thinking and skills of computer three-dimensional modeling in children of senior preschool age.

Keywords: preschool education, three-dimensional thinking, 3D computer modeling, constructive and technical activities, ICT technologies in education.

В настоящее время значение интеллектуального потенциала человека приобрело особую актуальность. Современные формы инженерной деятельности и других специальностей (архитектура, дизайн) на основе 3D проектирования оперируют понятиями, которые основаны на математических способностях и объемно-пространственном мышлении специалиста»[2].

В работах И.С. Якиманской, И.Я. Каплуновича, В.С. Столетнева, Т.В. Андрюшиной и других исследователей пространственное мышление определено «как особого вида умственная деятельность, обеспечивающая создание пространственных образов и оперирование ими в процессе решения различных практических и теоретических задач»[4].Образные формы познания в новой информационной среде на основе виртуальных сред актуализируются на новом уровне, как отмечает В.В. Брофман, «виртуальный мир и вероятностный, мир выбора и принятия решений сегодня апеллирует к целостному образному видению, психологическому структуированию пространства…Активизация образной сферы в обучении с совершенной очевидностью будет все более

востребована. Причем выстроенная на значительно более глубоких основаниях…»[3].

Условия для развития общих интеллектуальных способностей, в том числе специальных способностей, к которым можно отнести объемно-пространственное мышление, важно создать на этапе дошкольного возраста, так как, по мнению многих ученых (Л.А. Венгер, А.И. Савенков), интеллектуальный потенциал человека формируется в условиях дошкольного детства, когда в специфических формах дошкольной деятельности развиваются общие умственные способности, которые обеспечивают интеллектуальную деятельность взрослого человека [8].

Традиционные методы развития объемно-пространственного мышления детей старшего дошкольного возраста в основном базируются на формах конструктивно-модельной деятельности на основе различных наборов конструкторов, но возможны иные формы деятельности для развития объемно-пространственного мышления у детей старшего дошкольного возраста, которые основаны на возможностях ИКТ-технологий.

Проектной группой разработчиков (ООО «АВСПАНТЕРА», Молоднякова А.В., автор-разработчик, Мочалов П.С., технический специалист, Ковязин А.В., дизайн) было разработано инновационное программное обеспечение для компьютерного 3D моделирования – программа ЭВМ «электронная среда для 3D моделирования LigroGame», свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ LigroGame от 17.03.2020, регистрационный № 2020613459. Функциональные возможности программы позволяют использовать команды с объемными геометрическими телами для создания 3D модели. Сохраненные 3D модели в формате файлов с расширением *stl могут быть распечатаны на 3D принтере или использованы для виртуальных сцен в формате AR/ VR. Данное решение предполагает реализацию образовательной практики развития общих интеллектуальных и специальных способностей, к которым относят объемно-пространственное мышление, детей старшего дошкольного возраста на основе радикального новшества – технологии игрового компьютерного математического 3D моделирования. [1, С. 158].

В условиях образовательного учреждения технология игрового компьютерного математического 3D моделирования реализуется в комплексе материально-технических и учебно-методических условий, которые обозначены, как «компьютерно-игровой комплекс «LigroGame». Данный комплекс реализует модель электронного обучения 1:1 (1 ребенок-1 электронное устройство) на основе программы ЭВМ «электронная среда для 3D моделирования LigroGame», где дети осваивают методы математического моделирования на объемных геометрических телах.

Рисунок 1 – Интерфейс электронной среды для 3D-моделирования LigroGame, режим «создать проект»

Рисунок 2 – Компьютерно-игровой комплекс LigroGame на базе московской школы Марьина Роща им. В.Ф. Орлова

Для апробации и внедрения данного решения в условиях дошкольного и дополнительного образования была разработана дополнительная программа естественнонаучной и технической направленностей «Играем и моделируем в LigroGame» (автор-разработчик Молоднякова А.В.), которая включает 3 образовательных модуля, создающих условия для развития общих интеллектуальных способностей и объемно-пространственного мышления детей на основе дидактических пособий к игровой технологии компьютерного 3D моделирования в LigroGame. Содержание образовательных практик программы

предполагает освоение детьми понятий об объемных геометрических телах в математических экспериментах как в непосредственной деятельности с эталонами форм, так и в экспериментах с виртуальными объемными телами из галереи форм в 3D LigroGame. Эти представления становятся базой для компьютерного моделирования объектов разного типа на основе объемных геометрических тел. О том, что восприятие реальных объектов окружающего мира основано на базовых формах объемной геометрии, описано в теории распознавания по компонентам (recognition-bycomponents, RBC) И. Бидермана. В данной теории «перцептивное распознавание объектов по Бидерману представляется как процесс, в котором первичное изображение сегментируется на простые геометрические компоненты, такие как блоки, цилиндры, клинья и конусы» [5]. Данные компоненты обозначены Бидерманом геонами и они представляют из себя базовый набор форм, на которых строится объемное восприятие и распознавание образов предметного мира. Согласно данной теории «зрительная система располагает целым алфавитом из 24 распознаваемых базовых формы; из них формируются блоки для построения всех объектов, которые мы видим и идентифицируем»[5]. В рамках данной теории можно рассматривать математическое моделирование на основе базовых геометрических тел, как идентичное перцептивной функции распознавания объема предметов реального окружения, на которой базируется, в частности, объемно-пространственное мышление.

Метод моделирования в дошкольной педагогике является одним из эффективных педагогических методов развития познавательных способностей детей, где инструментом познания может стать модель. Заключается он в том, что мышление ребенка развивают с помощью специальных схем, моделей, которые в наглядной и доступной для него форме воспроизводят скрытые свойства связи того или иного объекта [8]**.** Для овладения способами схематизации и кодирования объекта логика программы предполагает на первом этапе освоение детьми в игровой форме способов знаково-символического моделирования объектов живой или неживой природы на основе модели ЭПЗ («элемент мира – признак – значение признака»), так как данные признаки интегрированны в виде команд в интерфейсе программы ЭВМ «электронная среда для 3D моделирования LigroGame» в режиме «создать проект».

Во втором модуле программы дети учатся создавать 3D модели на базовых объемных геометрических телах из 2-х-3-х форм на основе схем и чертежей, закрепляя представления о свойствах объемных тел и способах их преобразования на основе блока команд интерфейса режима «создать проект». Для действий с объемными геометрическими телами в виртуальной 3D среде LigroGame был разработан индикатор пространственных позиций, визуально обозначенный «черепашкой», который ориентирует детей в пяти пространственных позициях

формы на рабочем поле режима «создать проект»: «вид спереди», «вид справа», «вид сзади», «вид слева», «вид сверху». Данные представления закрепляются на первом этапе в подвижной игре «черепашка», где дети через движения своего тела определяют пространственные позиции. На следующем этапе эти представления переносятся на объект. Данный подход обусловлен психофизиологическими особенностями дошкольника, где «основой различения пространственных направлений служит различение частей тела, определение сторон на самом себе» [6].

Для овладения детьми старшего дошкольного возраста пространственными понятиями, связанными с объемными и геометрическими телами, был разработан лабораторный комплекс дидактических пособий «Черепашка» на основе схем и чертежей, так как «способности к живому представлению (репрезентации) пространственных соотношений формируются в процессе применения и «чтения» схем, графиков и чертежей» [9, С.149]. В математическом эксперименте «Осьминожка играет с Черепашкой» дети фиксируют результаты определения геометрической проекции формы в определенной позиции в виде геометрических фигур на схеме, разработанной для данного эксперимента. По мнению специалистов, «пространственные образы, которыми оперирует мышление, должны быть динамичными, подвижными, оперативными. Подвижность, динамичность образов обусловлена тем, что в процессе решения задач требуется постоянный переход от объемных (трёхмерных) изображений к плоскостным (двухмерным и обратно, от восприятия реальных объектов к их графическим изображениям)»[4]. На следующем уровне эти позиции определяются путем поворота рабочего поля с формой в трехмерной среде LigroGame, где «черепашка» демонстрирует детям определенную пространственную позицию объемного геометрического тела. Таким образом, у детей формируются представления о пространственных позициях объекта в виртуальной среде, что позволяет перейти к моделированию трехмерных форм.

Рисунок 3 – Лабораторный комплекс «Черепашка»

Для графического изображения объемного объекта используется чертеж «Черепашка», который предлагает детям изобразить объект посредством геометрических фигур в трех пространственных позициях: «вид спереди», «вид сбоку», «вид сверху». Чертеж имеет свои особенности построения и является «своеобразным синтезом геометрических знаний и графических навыков» [9, С.149]. «В чертеже объем предмета передается посредством изображения трех его проекций, соответствующих трем измерениям пространства» [9, С.149]. Чтобы научить детей старшего дошкольного возраста «читать» и использовать чертеж мною был разработан проекционный конструктор «Черепашка», где на первом этапе организуется объемное конструирование геометрических тел на основе трех пространственных позиций дидактического пособия. Дидактическое пособие складывается определенным образом из плоскости в трехмерное пространство и ориентирует детей на основе изображения «черепашки» в углах пособия в трех пространственных позициях объемного тела. Дети в игре с объемной «черепашкой» учатся определять в геометрических фигурах проекции объемного тела и фиксировать их в плоскости чертежа. Для наглядности эксперимента используется прием оптического эффекта. Использование данного дидактического пособия в условиях математического эксперимента позволяет наглядно продемонстрировать детям понятие пространственной проекции объемного тела в элементарном виде и научить схематично фиксировать полученные результаты в чертеже. Чертеж объекта в геометрических символах становится основой для 3D моделирования в LigroGame.

Рисунок 4 – Математический эксперимент с комплектом «Черепашка» для определения пространственных проекций объемных тел на основе оптического эффекта

Проектная деятельность в третьем модуле программы на 2-м году обучения предполагает обучение детей созданию 3D моделей по замыслу с использованием метода «геометрического рисунка» или метода морфологического анализа (Ф.Цвикке) на схеме LigroGame «признак – значение признака» и реализации 3D моделей в интерактивных проектах виртуальной платформы cospaces.io/edu. Дети в знаково-символической форме создают схему будущей 3D модели, а также вносят в схему новые значения, если это влияет на технический результат проекта. Сценарий интерактивного проекта создается посредством команд кода платформы и позволяет детям изучить такие пространственные понятия, как время, скорость, расстояние на элементарном уровне в действиях с 3D моделями LigroGame.

Образовательные результаты детей в рамках педагогического мониторинга дополнительной программы «Играем и моделируем в LigroGame» оцениваются по методике анализа продуктов детской деятельности. Результаты диагностики на группе детей старшего дошкольного возраста (5 и 6,5 лет) дошкольного учреждения в количестве 43 человек, 1-й учебный год, 36 часов:

– умение составить чертеж для объемного тела из 3-4 частей на геометрических символах на среднем уровне у 76 % респондентов;

– умение составить знаково-символическую модель объекта до 4-х частей на основе модели «элемент мира-признак-значение признака» на среднем уровне у 87 % респондентов;

– компьютерное 3D моделирование в «LigroGame»на основе 2-3-х геометрических тел по схеме или чертежу у 91% респондентов;

Таким образом, для формирования нового уровня познавательной деятельности у детей старшего дошкольного возраста, которая развивает такие специфические формы умственной деятельности, как объемно-пространственное мышление, необходимо создавать комплексные условия для таких видов деятельности, как схематизация объемных тел на основе пространственных понятий, проекционное конструирование, 3D моделирование в электронной среде, где возможно оперировать математическими идеями и представлениями, которые недоступны в конструктивной деятельности с традиционными наборами строительных блоков и дидактическими играми для дошкольного образования детей. Актуальность новых форм естественно-математического и научно-технического образования на основе 3D-технологий на уровне дошкольного образования связано с возрастными возможностями данного периода развития, где образные формы познания находятся в сензитивном периоде, и приобретает важное значение для современного обучения детей с учетом динамичной цифровизации всех сфер деятельности человека.

Компьютерно-игровой комплекс «LigroGame» входит в Реестр лучшего учебного оборудования и средств обучения, сформированный по итогам

Конкурсного отбора лучшего отечественного учебного оборудования и средств обучения (2020), включая цифровые, при содействии Агентства Стратегических Инициатив и ActivityEdy для обеспечения эффективного освоения обучающимися основных и дополнительных общеобразовательных программ по направлениям «Проектная деятельность» и «Технологии», является участником проекта «КРЕАТИВ – ПАРК» Научного Центра Российской академии образования на базе Российского государственного профессионально – педагогического университета.

Указанные организационно-педагогические условия позволяют спроектировать новую целостную образовательную среду конвергентного STEM образования на базе образовательного учреждения, обладающую рядом преимуществ, среди которых инновационными являются:

– обогащение детской деятельности образовательными практиками по компьютерному 3D моделированию;

– обогащение предметно-игровой среды детей продуктами детского технического творчества на основе технологий 3D печати и виртуальной реальности;

Библиографический список

1. Молоднякова А. В. Технология игрового 3D моделирования в LigroGame как инновационный метод для развития естественно-математических представлений детей дошкольного возраста на основе цифровых технологий / А. В. Молоднякова // Психология личности: культурно-исторический подход : материалы XX Междунар. чтений памяти Л. С. Выготского (Москва, 18–20 нояб. 2019 г.) / под ред. Г. Г. Кравцова. – Москва, 2019. – Т. 2. – С. 158.
2. Молоднякова А. В. Формирование раннего инженерного и технологического образования в условиях технологической насыщенности системы дошкольного образования / А. В. Молоднякова, С. М. Лесин // Интерактивное образование. – 2018. – № 3. – С. 38–42.
3. Брофман Вера Владимировна. Школа Венгера // СДО. – 2010. – № 3. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/shkola-vengerat_blank (дата обращения: 30.05.2021).
4. Структура пространственного мышления // Студенческая библиотека онлайн. – URL: https://studbooks.net/1757618/pedagogika/struktura_prostranstvennogo_myshleniya (дата обращения: 30.05.2021).
5. Теория распознавания по компонентам (recognition-bycomponents, RBC) И. Бидермана // Студми. Учебные материалы для студентов. – URL: https://studme.org/182287/psihologiya/teoriya_raspoznavaniya_komponentam_recognition_bycomponents_bidermana (дата обращения: 30.05.2021).
6. Система работы по формированию пространственных представлений у дошкольников // Studfile : Файловый архив студентов. – URL: https://studfile.net/preview/6207653/page:38/ (дата обращения: 30.05.2021).

7. Детский сад – Лигрёнок : офиц. сайт. – URL: http://ligrenok.ru (дата обращения: 30.05.2021).
8. Развитие познавательных способностей в процессе дошкольного воспитания / Л. А. Венгер, Е. Л. Агаева, Н. Б. Венгер [и др.] ; под ред. Л. А. Венгера. – Москва : Педагогика, 1986. – 224 с.
9. Ананьев Б. Г. Особенности восприятия пространства у детей / Б. Г. Ананьев, Е. Ф. Рыбалко. – Москва : Просвещение, 1964. – 304 с.

УДК 621.039.73

Морданов С.В., Ташлыков О.Л., Хомяков А.П.,
Ремез В.П., Бессонов И.А., Чалпанов С.В.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СОРБЕНТОВ ДЛЯ ИОНОСЕЛЕКТИВНОЙ ОЧИСТКИ ЖРО

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных измерений удельного гидравлического сопротивления ионоселективных сорбентов НПП «ЭКСОРБ», предназначенных для очистки ЖРО. Показано, что измеренные значения гидравлического сопротивления отличаются от расчетных по уравнению Эргуна на 25–200 %, при этом погрешность расчета систематическая и определяется заданным размером частиц сорбента. Предложено дополнить уравнение Эргуна корректировочными коэффициентами для фрикционного и динамического слагаемых. Методами регрессионного анализа получены значения корректировочных коэффициентов для рассмотренных сорбентов. Погрешность расчета по модифицированному уравнению Эргуна составляет 4–12 %.

Ключевые слова: уплотненный слой, гидравлическое сопротивление, ионоселективные сорбенты, уравнение Эргуна.

Abstract. The results of experimental measurements of specific hydraulic resistances of LRW treatment EKSORB sorbents are presented. It is shown that the Ergun equation calculation systematic error for the irregular shape and size particles is about 25-200 % and depends on the particle size. It is proposed to modify Ergun's equation with frictional and dynamical correction coefficients. The values of the EKSORB ion-selective sorbents correction coefficients are defined using the regression analysis. The calculation error of the modified Ergun equation is about 4-12 %.

Keywords: packed bed, hydraulic resistance, ion-selective sorbent, Ergun equation

Введение

Жидкие радиоактивные отходы (ЖРО) образуются при работе реакторных установок, дезактивации оборудования, помещений и спецодежды [1]. ЖРО представляют собой гомогенные или гетерогенные смеси (пульпы, эмульсии, суспензии) в кислом или щелочном состоянии. Эксплуатационные ЖРО загрязнены продуктами деления (цезий, стронций, йод), радионуклидами коррозионного происхождения (кобальт, никель, марганец), веществами, используемыми для поддержания водно-химического режима и дезактивации оборудования [2], [3].

Радиоактивные вещества в растворах кубовых остатков находятся в виде ионов, нейтральных молекул и коллоидных частиц. Основными радионуклидами в кубовых остатках являются ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{60}Co, ^{54}Mn. Для изотопов цезия характерна ионная форма нахождения. Радионуклиды кобальта и марганца в

кубовых остатках находятся в форме комплексов с соединениями, которые используются для дезактивации оборудования (щавелевая, муравьиная, лимонная и этилендиаминтетрауксусная (ЭДТА) кислоты).

Основной задачей при обращении с ЖРО является окончательная изоляция кондиционированных РАО. Среди методов кондиционирования наибольшее сокращение объемов ЖРО происходит при селективной сорбции. Это определяет её преимущества и позволяет сконцентрировать радионуклиды в небольшом объеме сорбента [4].

Процесс очистки ЖРО на установке ионоселективной очистки (ИСО) включает в себя: предварительную фильтрацию и подготовку исходного раствора, озонирование, фильтрацию и селективную сорбцию на ферроцианидных сорбентах в фильтрах-контейнерах (ФК). Конечными продуктами переработки являются очищенный от радионуклидов солевой раствор, отработавший сорбент в ФК, шлам с фильтров, образующийся в результате озонирования (объемная активность находится на уровне исходных ЖРО) [5].

Высокая вариативность сорбционных свойств и селективности к различным радионуклидам, а также возможность менять физико-химические параметры сорбентов в зависимости от требований конкретного технологического процесса, позволяют эффективно решать вопросы очистки ЖРО практически любого состава.

В качестве аппаратурного оформления процессов ионоселективной очистки, сорбции и ионного обмена часто применяется различное технологическое оборудование с уплотненным слоем (колонны, фильтры). Одной из основных задач при расчете или подборе такого оборудования является определение гидравлического сопротивления уплотненного слоя.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований гидравлического сопротивления ферроцианидных сорбентов НПП «ЭКСОРБ» СМЕТ, РАЦИР и МОДИКС, и сравнение результатов экспериментальных измерений гидравлического сопротивления слоев сорбентов с результатами расчета с использованием классических инженерных методик.

Методики расчета гидравлического сопротивления уплотненного слоя

Технологические среды в оборудовании с уплотненным слоем часто движутся в ламинарном режиме, при этом значение критерия Рейнольдса может составлять 1–10 и даже меньше. Одной из основных проблем расчета таких потоков является определение гидравлического сопротивления. В ламинарном режиме течения потери напора определяются как затратами на создание скорости потока (динамической составляющей), так и трением между слоями жидкости и на границе жидкости и частиц уплотненного слоя (фрикционной составляющей).

Коэффициент гидравлического сопротивления при этом не является постоянной величиной и с ростом значения критерия Рейнольдса обычно существенно снижается [6–8]. Зависимость гидравлического сопротивления уплотненного слоя от скорости потока через данный слой может быть установлена экспериментально или с помощью различных, часто полуэмпирических, расчетных методов [9–11].

Наиболее широкое распространение в практике, как классических инженерных расчетов, так и численного моделирования методами вычислительной гидродинамики (англ. – *CFD*, *Computational Fluid Dynamics*), получили методики расчета гидродинамических эффектов, основанные на использовании уравнений Дарси-Форххаймера [12-14]. Одна из таких методик была предложена в 1952 г. С. В. Эргуном для расчета гидравлического сопротивления насадочных колонн [9]. По уравнению Эргуна удельное гидравлическое сопротивление слоя насадки (или уплотненного слоя) рассчитывают следующим образом:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{150\mu(1-\xi)^2}{d_p{}^2\xi^3} u_{eff} + \frac{1.75\rho(1-\xi)}{d_p\xi^3} u_{eff}{}^2, \qquad (1)$$

где Δp – гидравлическое сопротивление, Па; L – высота слоя насадки (уплотненного слоя), м; μ – вязкость жидкой фазы, движущейся через уплотненный слой, Па·с; ξ – порозность уплотненного слоя; d_p – характерный размер частицы уплотненного слоя, м; u_{eff} – эффективная скорость потока через уплотненный слой (отнесенная к полному поперечному сечению аппарата), м/с; ρ – плотность жидкой фазы, кг/м^3.

В тех случаях, когда частицы уплотненного слоя имеют нерегулярные размеры и (или) неправильную форму, порозность слоя непостоянная по его высоте или радиусу, а также в других специальных случаях уравнение Эргуна может быть модифицировано с использованием различных, часто чисто эмпирических, коэффициентов [6–8]. Идельчик приводит уравнение Эргуна в безразмерном виде [15]:

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{d_p} \frac{\rho u_{eff}{}^2}{2} = \left(\frac{A}{Re} + B\right) \frac{L}{d_p} \frac{\rho u_{eff}{}^2}{2}, \qquad (2)$$

$$Re = \frac{u_{eff} d_p \rho}{\mu}, \qquad (3)$$

где A и B – эмпирические коэффициенты, зависящие от формы, размеров и структуры поверхности частиц уплотненного слоя; λ – коэффициент трения.

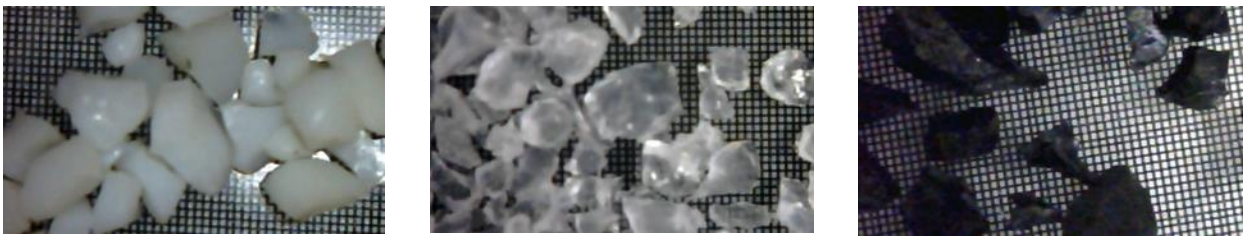
В нашей работе для расчетного определения гидравлического сопротивления уплотненных слоев ионоселективных сорбентов использовалось уравнение Эргуна (1) в начальном виде [9]. В дальнейшем, после регрессионной обработки результатов измерений, уравнение Эргуна было нами модифицировано с использованием корректировочных эмпирических коэффициентов.

Экспериментальные материалы, методика и оборудование

В данной работе мы использовали ферроцианидные ионоселективные сорбенты для очистки ЖРО НПП «ЭКСОРБ» СМЕТ, РАЦИР и МОДИКС. В нашей предыдущей работе экспериментально были определены параметры данных сорбентов, необходимые для расчета по уравнению Эргуна: насыпная и истинная плотности, порозность и средние размеры частиц [16]. Характеристика ионоселективных сорбентов представлена в таблице 1. Микрофотографии сорбентов представлены на рисунке 1. Следует отметить, что представленные сорбенты обладают нетипичными свойствами. Так порозность представленных образцов составляет 0,187–0,234, тогда как обычные значения порозности для сыпучих материалов составляют 0,4–0,5. По нашему мнению, такие низкие величины порозности связаны с нерегулярными размерами и формой частиц сорбентов (см. рисунок 1). Кроме того, частицы рассмотренных образцов имеют склонность к истиранию при транспортировке и хранении и при работе (в особенности для сорбента МОДИКС).

Таблица 1 – Свойства сорбентов НПП «ЭКСОРБ»

Параметр	Ионоселективный сорбент			Погрешность измерений
	СМЕТ	РАЦИР	МОДИКС	
Насыпная плотность, кг/м^3	1320	1092	959	11,1 %
Порозность	0,214	0,187	0,234	12,5 %
Истинная плотность, кг/м^3	1681	1343	1252	17,1 %
Средний размер частиц, мм	0,9	0,8	1,4	7,1 %



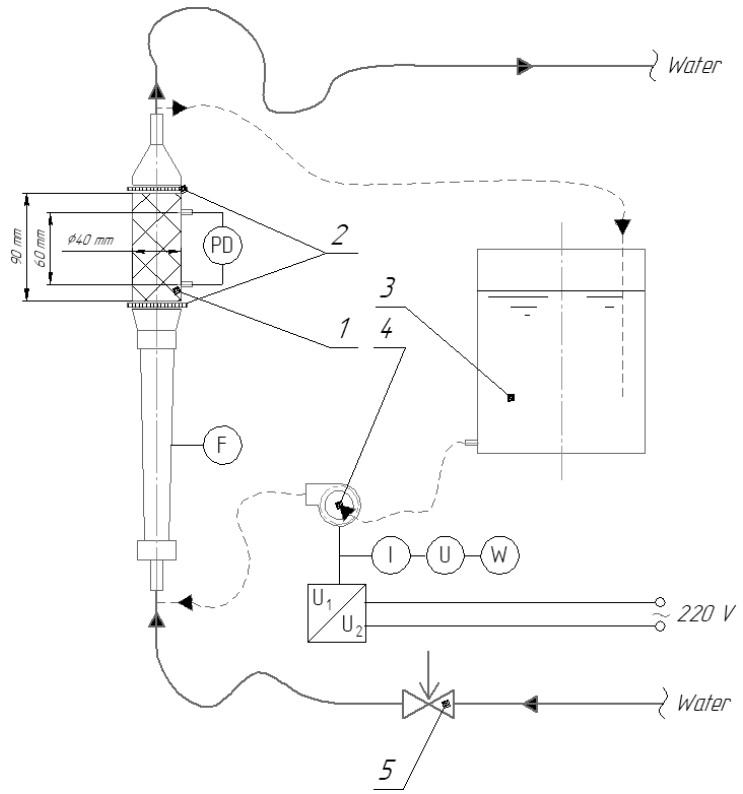
а) *б*) *в*)

Рисунок 1 – Микрофотографии сорбентов НПП «ЭКСОРБ»: а) СМЕТ, б) РАЦИР, в) МОДИКС

Для измерения удельного гидравлического сопротивления представленных ионоселективных сорбентов использовали лабораторную установку, представленную на рисунке 2. Лабораторная установка состоит из заполненной сорбентом измерительной колонны *1*, фильтров *2*, бака *3*, центробежного насоса *4*, вентиля *5*, дифференциального манометра *PD*, расходомера (ротаметра) *F*, амперметра *I*, вольтметра *U*, ваттметра *W* и преобразователя напряжения переменного тока U_1/U_2. Лабораторная установка может работать в двух режимах: на воде из водопроводной сети (сплошные линии на рисунке 2) или на воде из бака *3* (пунктирные линии на рисунке 2). В первом случае управление расходом осуществляется с помощью вентиля *5*, во втором – напряжением переменного тока, подающегося на центробежный насос *4*. Установка работает следующим образом. Вода поступает на установку из водопроводной сети или из бака *3*, проходит через расходомер *F* и измерительную колонну *1* и отводится в канализацию или обратно в бак *3*. При этом расход воды фиксируется расходомером *F*, а снижение напора на уплотненном слое сорбента – дифференциальным манометром *PD*. Характеристики измерительных приборов лабораторной установки представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики измерительных приборов

Измеряемая величина	Измерительный прибор	Цена деления	Пределы измерений	Погрешность измерений
Перепад давления	Дифференциальный манометр HT-1890	0,1 см вод. ст.	0-140,6 см вод. ст.	0,3 %
Расход воды	Ротаметр LZS-15	5 л/ч	10–100 л/ч	± 2,5 л/ч
Электрическое напряжение	Электрическое измерительное устройство PZEM-021	1 В	80–260 В	1,0 %
Сила тока		0.01 А	0–20 А	
Электрическая мощность		0.1 Вт	0–999 Вт	

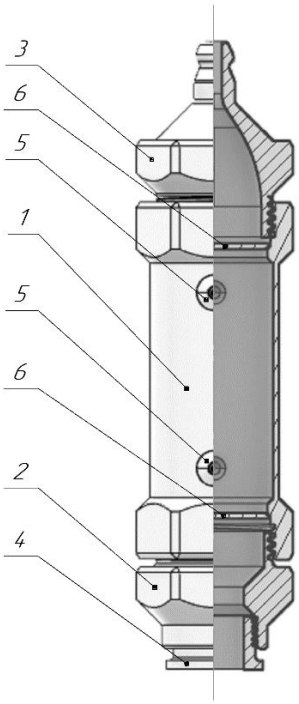


1 – измерительная колонна, 2 – фильтры, 3 – бак, 4 – центробежный насос, 5 – вентиль, PD – дифференциальный манометр, F – расходомер (ротаметр), I – амперметр, U – вольтметр, W – ваттметр, U_1/U_2 – преобразователь напряжения переменного тока

Рисунок 2 – Лабораторная установка для измерения гидравлического сопротивления уплотненных слоев.

Внутренний диаметр измерительной колонны *1* составляет 40 мм, расстояние между штуцерами дифференциального манометра (высота уплотненного слоя сорбента) – 60 мм. Измерительная колонна *1* и фильтры *2* изготовлены методом FDM-3D-печати (послойной экструзии) из полиэтилентерефталата. Размер пор фильтров *2* составляет 0,2 мм. Эскиз и фотография измерительной колонны представлены на рисунке 2.

Внутренний диаметр колонны выбирали таким, чтобы эффективная скорость в сечении колонны в заданных диапазонах расходов воды соответствовала эффективной скорости ЖРО в промышленных технологических сорбционных аппаратах. Совместная компоновка измерительной колонны использовалась для снижения гидравлического сопротивления установки. Ранее [16, 17] использовалась измерительная колонна с внутренним диаметром 40 мм и расстоянием между штуцерами дифференциального манометра 705 мм. Однако из-за низкой порозности представленных образцов сорбентов гидравлическое сопротивление уплотненного слоя высотой более 800 мм существенно превышало пределы измерений дифференциального манометра *PD*.



1 – корпус, 2 – приемная камера, 3 – отводящая камера, 4 – втулка ротаметра, 5 – штуцера манометра, 6 – фильтры

а)

б)

Рисунок 2 – Измерительная колонна: а) эскиз, б) фотография (с ротаметром)

Кроме того ни центробежный насос *4*, ни (в меньшей мере) напор водопроводной сети не могли обеспечить стабильный расход воды через измерительную колонну с расстоянием между штуцерами манометра 705 мм.

В итоге при пуске установке с колонной [16, 17] от водопроводной сети произошло выдавливание прокладок колонны [16, 17], а после дополнительных мер по герметизации колонны – разрушение стенки колонны в месте соединения со втулкой промежуточного фланца. В связи с этим для вновь изготовленной измерительной колонны *2* (рисунок 2, *б*) толщина стенки по цилиндрической части была увеличена с 1 до 2,5 мм, фланцевые соединения заменены резьбовыми соединениями, а клеевые соединения штуцеров дифференциального манометра с корпусом колонны – сварными соединениями.

Кроме того, из-за относительно высокого гидравлического сопротивления уплотненных слоев рассмотренных сорбентов и, с одной стороны, необходимости обеспечения стабильных малых расходов воды через колонну и, с другой стороны, работы в диапазоне измерений дифференциального манометра пределы изменения расходов воды через уплотненный слой сорбента были скорректированы до следующих значений:

– для сорбента СМЕТ: 60–100 л/ч;

– для сорбента РАЦИР: 20–60 л/ч;

– для сорбента МОДИКС: 60–100 л/ч.

Измерения производили при температуре воды 20–25 °С, температуре воздуха в лаборатории 17–22 °С. Для каждого режима работы выполняли пять параллельных измерений. Статистическую обработку результатов измерений осуществляли методом Стьюдента [18–20]. Значения критерия Стьюдента t принимали также по [18–20] с доверительными вероятностями:

– для сорбентов СМЕТ и РАЦИР – 0,9 (t = 1,476);

– для сорбента МОДИКС – 0,85 (t = 1,746).

По результатам статистической обработки отбраковки результатов измерений не потребовалось.

Результаты и обсуждение

На рисунке 3 представлены зависимости гидравлических сопротивлений сорбентов СМЕТ (рисунок 3, *а*), РАЦИР (рисунок 3, б) и МОДИКС (рисунок 3, *в*) при высоте слоя 60 мм, полученные в результате обработки экспериментальных данных и расчетным путем по уравнению Эргуна (1).

По результатам статистической обработки средняя полная погрешность измерений составляет:

– для сорбента СМЕТ – 6,7 % (3,4 см вод. ст.);

– для сорбента РАЦИР – 4,7 % (2,4 см вод. ст.);

– для сорбента МОДИКС: – 10,3 % (4,4 см вод. ст.).

Совместный анализ результатов измерений и расчетов гидравлического сопротивления представленных образцов показывает, что средние и максимальные погрешности расчета по уравнению Эргуна (1) существенно превышают полную погрешность измерений и составляют соответственно:

– для сорбента СМЕТ – 263 % и 370 %;

– для сорбента РАЦИР – 227 % и 294 %;

– для сорбента МОДИКС: – 26,6 % и 54,8 %.

В абсолютных значениях измеренные значения удельного гидравлического сопротивления уплотненных слоев для сорбентов существенно в ниже измеренных:

– для сорбента СМЕТ – на 110–16 см вод. ст.;

– для сорбента РАЦИР – на 48–202 см вод. ст.;

– для сорбента МОДИКС – на 3–15 см вод. ст.

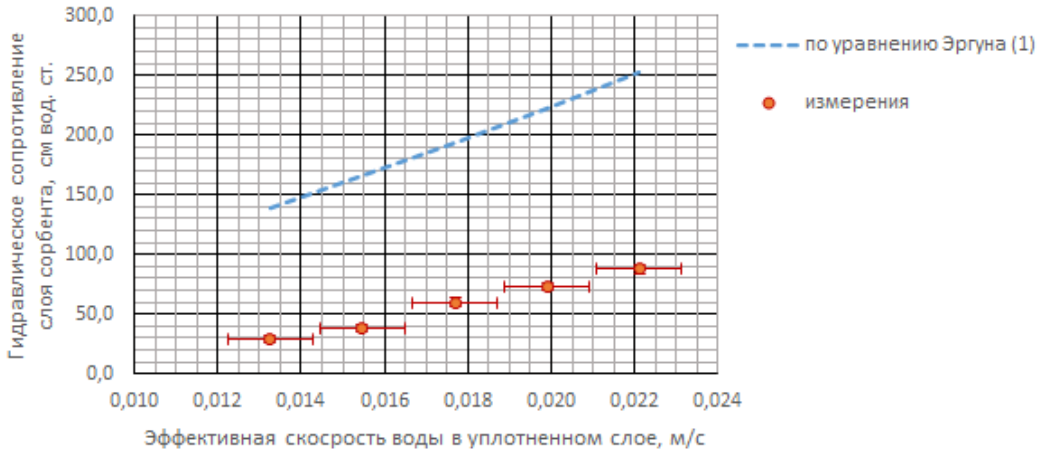
Таким образом, использование уравнения Эргуна в исходном виде (1) для расчета гидравлического сопротивления при проектировании или подборе

технологического оборудования для отчистки ЖРО с помощью рассмотренных ионоселективных сорбентов НПП «ЭКСОРБ» невозможно.

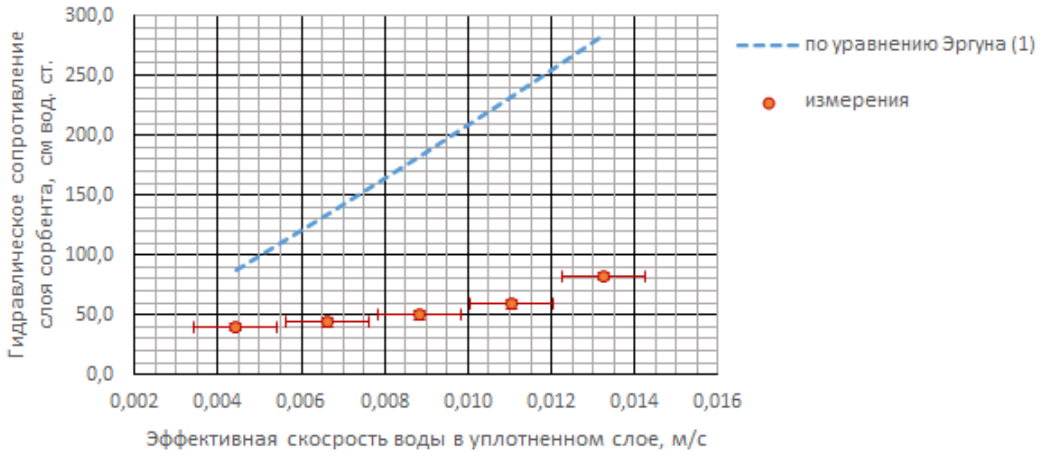
Причинами высокой погрешности расчета по уравнению (1), на наш взгляд являются:

– достаточно широкий диапазон размеров частиц рассмотренных образцов даже для относительно точно определенных средних размеров частицы уплотненного слоя сорбента – 7,1 % (± 0,06–0,09 мм);
– неправильная форма частиц сорбентов (см. рисунок 1);
– истирание частиц сорбентов.

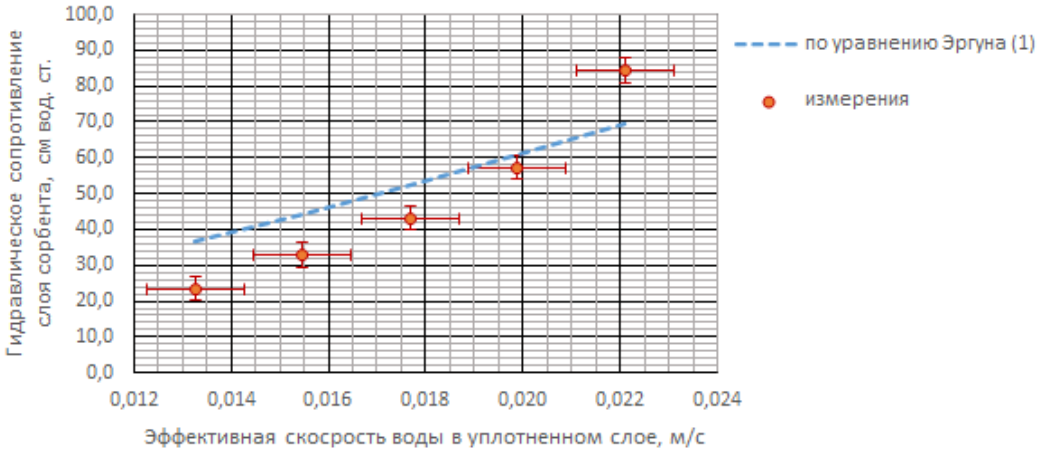
Истирание частиц сорбентов было отмечено как во время хранения (в особенности для сорбента МОДИКС), так и во время работы. Следует отметь, что после проведения серий испытаний на каждом сорбенте проходилось промывать фильтры и даже ротаметр, так как продукты истирания перекрывали часть ячеек фильтров и зазор между стенкой корпуса и поплавком ротаметра.



а)



б)



в)

Рисунок 3 – Расчетные и измеренные зависимости гидравлического сопротивления сорбентов НПП «ЭКСОРБ» от эффективной скорости в уплотненном слое: а) СМЕТ, б) РАЦИР, в) МОДИКС

При этом, налипания частиц сорбента на стенки колонн и ротаметра во влажном и сухом состоянии не происходило (измерительная колонна, как отмечалось ранее, изготовлена из полиэтилентерефталата, корпус ротаметра – из полиметилметакрилата).

Все расчетные зависимости гидравлического сопротивления слоев сорбентов от эффективной скорости воды в уплотненном слое являются практически линейными. То есть, согласно методике Эргуна, в рассмотренных диапазонах эффективных скоростей в слое сорбента фактором, лимитирующим гидравлическое сопротивление должно являться трение слоев воды друг о друга и о поверхность частиц сорбента. По результатам измерений такая ситуация характерна только для сорбента СМЕТ (рисунок 3, *а*). Для сорбентов РАЦИР и МОДИКС хорошо заметен переход к турбулентному режиму течения: для сорбента РАЦИР – при эффективной скорости в уплотненном слое 0,011–0,012 м/с; для сорбента МОДИКС – при эффективной скорости в уплотненном слое 0,019–0,020 м/с.

Следует заметить, что критерий Рейнольдса из расчета по размеру частицы [15] при этом совершенно не коррелирует с поведением зависимости гидравлического сопротивления уплотненного слоя от условной скорости. Для сорбента РАЦИР в переходной области расчетный критерий Рейнольдса составляет 8,0–8,6; для сорбента МОДИКС – 25,0–27,5; для сорбента СМЕТ при «ламинарной» картине течения во всем рассмотренном диапазоне условных скоростей критерий Рейнольдса для частицы меняется в диапазоне 10,6–17,7.

Таким образом, по крайней мере для уплотненных слоев с частицами неправильной формы и нерегулярного размера, критерий Рейнольдса для частицы (как и для характерного сечения аппарата по условной скорости) не может являться объективным универсальным критерием, позволяющим судить о режиме течения жидкости через уплотненный слой.

Погрешность расчета удельного гидравлического сопротивления по уравнению Эргуна (1) носит систематических характер и зависит от заданных размеров частиц уплотненного слоя. На рисунке 4 представлены измеренная и расчетные зависимости гидравлического сопротивления слоя сорбента СМЕТ от условной скорости воды в уплотненном слое. Расчетные зависимости получены для следующих заданных размеров частицы сорбента: 0,9 мм (измеренный размер); 1,2 мм; 1,5 мм; 1,8 мм. Наиболее близкие измеренные и расчетные значения гидравлического сопротивления соответствуют заданному расчетному размеру частицы 1,5 мм. Данный эффект не может быть обусловлен только погрешностью измерения размеров частиц, так как полная погрешность измерений для данного параметра составляет 7,1 % (см. таблицу 1) или 0,06 мм в абсолютном выражении.

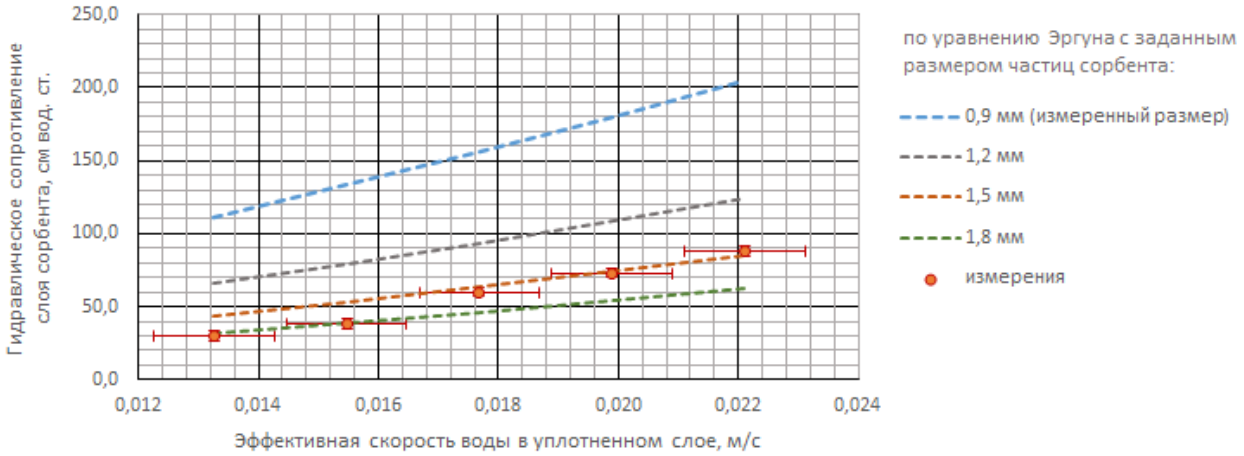


Рисунок 4 – Расчетные и измеренная зависимости гидравлического сопротивления сорбентов СМЕТ от эффективной скорости в уплотненном слое для разных заданных расчетных размеров частиц сорбента

Таким образом, показано, что погрешность вычислений при использовании уравнения Эргуна (1) для уплотненных слоев с частицами неправильной формы и нерегулярными размерами слушком велика и исключает возможность использования уравнения Эргуна (1) для инженерных расчетов. Для осуществления расчетов по конструированию, масштабированию или подбору оборудования для очистки ЖРО с помощью ионоселективных сорбентов НПП

«ЭКСОРБ» предлагается дополнить классическое уравнение Эргуна (1) эмпирическими корректировочными коэффициентами для фрикционной и динамической составляющих:

$$\frac{\Delta p}{L}=C_{fr}\frac{150\mu(1-\xi)^2}{d_p^{\,2}\xi^3}u_{eff}+C_{dyn}\frac{1.75\rho(1-\xi)}{d_p\xi^3}u_{eff}^{\,2}, \qquad (4)$$

где C_{fr}, C_{dyn} – соответственно фрикционный и динамический корректировочные коэффициенты.

Значения корректировочных коэффициентов для рассмотренных ионоселективных сорбентов были получены методом регрессионного анализа с использование программного комплекса SciLab. Результаты регрессионного анализа и значения погрешностей аппроксимации (погрешностей расчета по регрессионным уравнениям) представлены в таблице 3. Следует отметить, что для всех рассмотренных сорбентов (в том числе для СМЕТ с «ламинарной» картиной течения, см. рисунок 3, *а*) и фрикционный и динамический корректировочные коэффициенты являются значимыми.

Погрешность вычислений при использовании полученных уравнений составляет не более 4–12 %. Таким образом полученные уравнения можно использовать в практических инженерных целях.

Таблица 3 – Корректировочные коэффициенты уравнения Эргуна

Параметр	Ионоселективный сорбент		
	СМЕТ	РАЦИР	МОДИКС
Корректирующий фрикционный коэффициент C_{fr}	-0,0526	0,4108	-0,7796
Корректирующий динамический коэффициент C_{dyn}	1,9228	-0,8379	5,2546
Погрешность аппроксимации	4,3 %	11,5 %	7,4 %

Заключение

Получены экспериментальные зависимости гидравлического сопротивления уплотненных слоев ионоселективных ферроцианидных сорбентов НПП «ЭСОРБ» СМЕТ, РАЦИР и МОДИКС от условной скорости в уплотненном слое. Показано, что полученные по уравнению Эргуна расчетные гидравлические сопротивления данных сорбентов превышают измеренные в 1,5–3 раза. Таким образом, использование уравнения Эргуна в исходном виде для расчета гидравлического сопротивления при проектировании или подборе технологического оборудования для отчистки ЖРО с помощью рассмотренных ионоселективных сорбентов НПП «ЭКСОРБ» невозможно.

Причинами высокой погрешности расчета по уравнению Эргуна, на наш взгляд являются: широкий диапазон размеров частиц, неправильная форма частиц сорбентов, истирание частиц сорбента при хранении и эксплуатации.

Показано, что в отличие от прогноза по уравнению Эргуна, режим течения в уплотненном слое представленных сорбентов в рассмотренном диапазоне эффективных скоростей меняется с ламинарного на переходный или, возможно, турбулентный.

Установлено, что по крайней мере для уплотненных слоев с частицами неправильной формы и нерегулярного размера, критерий Рейнольдса для частицы является объективным универсальным критерием, позволяющим судить о режиме течения жидкости через уплотненный слой.

Показано, что погрешность расчета удельного гидравлического сопротивления по уравнению Эргуна для рассмотренных сорбентов носит систематических характер и зависит от заданных размеров частиц уплотненного слоя.

Предложено дополнить классическое уравнение Эргуна эмпирическими корректировочными коэффициентами для фрикционной и динамической составляющих. Значения корректировочных коэффициентов для рассмотренных ионоселективных сорбентов получены методом регрессионного анализа. Погрешность вычислений при использовании дополненного уравнения Эргуна и найденных эмпирических значений корректировочных коэффициентов составляет не более 4–12 %. Таким образом дополненное уравнение Эргуна может быть использовано в практических инженерных целях.

Показано, что одного только среднего размера частиц в уплотненном слое, без данных о форме частиц и дисперсии их размеров недостаточно для расчета гидравлических сопротивлений уплотненных слоев, как при использовании классических инженерных методик, так и при применении методов вычислительной гидродинамики. В будущих исследованиях необходимо не только определение средних размеров частиц сорбентов или ионообменных смол, но других параметров, характеризующих геометрические параметры частиц.

Для практического использования ионоселективных ферроцианидных сорбентов НПП «ЭСОРБ» рекомендуется разработать технические решения по усреднению размеров и форм частиц сорбентов. В качестве таких решений могут быть предложены механическая обработка частиц готовых сорбентов или решения на стадии синтеза, позволяющие снизить неравномерность размеров и неупорядоченность формы частиц.

Библиографический список

1. Ташлыков О. Л. Эксплуатация и ремонт ядерных паропроизводящих установок АЭС. Учебник. В 2 ч. Ч. 1 / О. Л. Ташлыков, А. Г. Кузнецов, О. Н. Арефьев. – Москва : Энергоатомиздат, 1995. – 256 с.
2. Ташлыков О. Л. Ремонт оборудования атомных станций : учебник / О. Л. Ташлыков ; науч. ред. С. Е. Щеклеин. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 352 с.
3. Ташлыков О. Л. Дозовые затраты персонала в атомной энергетике. Анализ. Пути снижения. Оптимизация : монография / О. Л. Ташлыков. – Саарбрюккен : LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 232 с.
4. Метод ионоселективной очистки жидких радиоактивных отходов атомных станций / А. Э. Арустамов, А. В. Зинин, П. В. Красников [и др.] // Безопасность жизнедеятельности. – 2005. – № 11. – С. 13–16.
5. Повышение эффективности локализации радионуклидов кобальт-60 и цезий-137 из жидких радиоактивных отходов в решении проблемы обеспечения радиационной безопасности АЭС / В. П. Ремез, О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин [и др.] // Ядерная физика и инжиниринг. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 129–137.
6. Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems / W.-Ch. Yang // China Particuology. –.2003. –.Vol. 1, Iss. 3. – P. 137.
7. Berk Z. Food Process Engineering and Technology / Z. Berk. – London : Academic Press, 2013. – 742 p.
8. Rhodes M. J. Introduction to Particle technology / M. J. Rhodes. – Chichester : John Wiley & Sons Ltd., 2017. – 472 p.
9. Ergun S. V. Fluid Flow through Packed Columns / S. V. Ergun // Chemical Engineering Progress. – 1952. – Vol. 48. – P. 89–94.
10. Computational Fluid Dynamics: Technologies and Applications / ed. by L. V. Minin, O. V. Minin. – Rijeka : InTech, 2011. – 408 p.
11. Duangkhamchan W. CFD Study of Top-Spray Fluidized Bed Coating Process / W. Duangkhamchan, F. Ronsse, J. G. Pieters // CFD Study of Top-Spray Fluidized Bed Coating Process. – Boca Raton, 2007. – P. 531–560.
12. Determination of Forchheimer Term in Porous Media Consisting of Obstacles of Different Sizes / R. X. Liu, A. Nakayama, X. L. Haung // Advanced Materials Research. – 2012. – Vol. 594/597. – P. 2537–2540.
13. Ciomolin F. Navier-Stokes/Forchheimer models for filtration through porous media / F. Cimolin, M. Discacciati // Applied Numerical Mathematics. – 2013. – Vol. 72. – P. 205–224.
14. Soulaine C. On the use of a Darcy-Forchheimer like model for a macro-scale description of turbulence in porous media and its application to structured packings / C. Soulaine, M. Quintard // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2014. – Vol. 74. – P. 88–100.
15. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик ; под ред. М. О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1992. – 672 с.
16. Investigation of hydrodynamics of motion of solutions in sorption pressure columns /

A. S. Lavrov, A. P. Khomyakov, S. S. Petsura, S. V. Mordanov [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2017. – Vol. 1886. – P. 020087-1–020087-7.
17. Simulation method of the low-Re flows in the packed bed technological equipment / A. P. Khomyakov, S. Mordanov, A. S. Lavrov, D. I. Grinyov // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 862. – P. 062020.
18. Зайдель А. Н. Элементарные оценки ошибок измерений / А. Н. Эйдель. – Ленинград : Наука, 1967. – 100 с.
19. Яковлев Г. П. Краткие сведения по обработке результатов физических измерений / Г. П. Яковлев. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2001. – 51 с.
20. Самойлов Н. А. Моделирование в химической технологии и расчет реакторов : учеб. пособие / Н. А. Самойлов. – Уфа : Монография, 2005. – 224 с. – ISBN 5-94920-050-0.

УДК 544.431

Морозов Я.О., Жижина У.В., Каграманов Ю.А.,
Рыжков А.Ф., Тупоногов В.Г.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКТОРА ТВЕРДОСОРБЕНТНОЙ СЕРООЧИСТКИ СИНТЕЗ-ГАЗА

Аннотация. В настоящем исследовании мы рассматриваем систему сухой теплой очистки синтез-газа (WGC). Целью этой системы является удаление сероводорода из синтез-газа без его охлаждения. Внедрение WGC в комбинированный цикл комплексной газификации (IGCC) может значительно повысить тепловую эффективность и снизить капитальные затраты. У WGC есть проблемы с деградацией и истиранием сорбента, которые увеличиваются с повышением температуры синтез-газа.

Цель данного исследования состояла в том, чтобы объединить знания о гидродинамике многофазных потоков и химическом механизме процесса WGC в одном совместном моделировании реактора с заглушкой WGC (стояк реактора с циркулирующим псевдоожиженным слоем) и предсказать эффекты деградации при нескольких основных режимах работы реактора.

Для достижения поставленной цели мы решили список задач. Был сформулирован вычислительный метод. Модель состояла из стандартных инструментов ANSYS Fluent. Система уравнений сохранения, Навье-Стокса, турбулентности, энергии, массы и действия в частных производных была решена с использованием метода конечных объемов.

Было два типа геометрии: холодный CFB и реактор. Холодный CFB (длина 0,1 м, ширина 0,3 м, высота 5 м) состоял из распределительной сетки, зоны смешивания и стояка. Он был дискретизирован в 3D-сетку со 150 тысячами шестигранных элементов. Реактор состоял из стояка. Стояк (диаметр 0,132 м и высота 15 м) был разделен на 2000 растянутых 2D прямоугольных элементов (100 элементов в радиальном направлении, 10 – в осевом).

Химический механизм процесса состоял из трех реакций: основной – реакции сульфидизации оксида цинка в сероводороде и двух побочных реакций восстановления оксида цинка в водороде и монооксиде углерода. Скорости реакции были рассчитаны с использованием модели уменьшенного сжимающегося ядра. Кинетические константы были взяты из наших предыдущих исследований, где частотный фактор был зафиксирован за счет включения удельной поверхности сорбента и его пористой структуры.

Для анализа качества прогнозов модели были проведены два типа верификационных расчетов. Первый тип расчетов был основан на экспериментальных данных из блока холодных испытаний (VTI experimental testing unit). Мы рассчитали распределение концентраций твердой фазы по высоте стояка, поля скоростей, распределения радиальных скоростей и восходящие и нисходящие потоки массы твердой фазы. Сетка была достаточно тонкой, чтобы обнаружить плотное кольцо твердой фазы вблизи стенок и действительно предсказать нисходящий поток твердой фазы. Второй тип моделирования был основан на экспериментальных данных испытательного блока Министерства энергетики США (DOE). В ходе совместного моделирования (гидродинамика + химия) мы определили объемную долю сероводорода на выходе, массовую долю выпаренного цинка на выходе, скорость конверсии и время пребывания газа и сорбента.

Проверенная модель была масштабирована и реализована в промышленном моделировании реактора WGC. Реактор испытывался в трех основных режимах: а) 2,1 МПа 844 К б) 2,1 МПа 923 К в) 3 МПа 844 К. Результаты показали, что температура оказывает наибольшее влияние на сдвиг селективности в сторону побочных реакций, поэтому режимы с температурой 923 К имели наиболее опасные условия для сорбента. Во время первого и третьего режимов скорость основной реакции была достаточно высокой, чтобы быть доминирующей.

Настоящее исследование содержит методы и рекомендации для совместного моделирования промышленных систем WGC.

Ключевые слова: синтез-газ, сероочистка, ЦКС, ANSYS.

Abstract. In current study, we consider system of dry syngas clean up (WGC). The aim of this system is to remove hydrogen sulfide from syngas without its cooling. WGC implementation in integrated gasification combined cycle (IGCC) may significantly increase thermal efficiency, and to decrease capital costs. WGC has problems with sorbent degradation and attrition that increase with syngas temperature rise.

The goal of this study was to combine knowledge about hydrodynamics of multiphase flows and chemical mechanism of WGC process in one coupled simulation of WGC plug flow reactor (riser of circulated fluidized bed reactor), and to predict degradation effects during several main regimes of reactor operation.

To reach the goal we solved list of objectives. The computational method was formulated. The model consisted of standard ANSYS Fluent instruments. System of conservation, Navier-Stokes, turbulence, energy, mass action partial differential equations were solved with the use of finite volume method.

There were two types of geometries: cold CFB and reactor. Cold CFB (length 0.1 m width 0.3 m height 5 m) consisted of distribution grid, mixing zone and riser. It was discretized into 3D mesh with 150 thousand of hexahedral elements. Reactor consisted from riser. Riser (diameter 0.132m and height 15 m) was divided into 2000 stretched 2D rectangle elements (100 elements in radial direction 10 – in axial).

Process chemical mechanism consisted of three reactions: main – reaction of zinc oxide sulfidization in hydrogen sulfide and two side reactions of reduction of zinc oxide in hydrogen and carbon monoxide. Reaction rates were calculated with reduced shrinking core model. Kinetic constants were taken from our previous studies; where frequency factor was fixed due to include specific surface area of sorbent and its porous structure.

Two types of verification calculations were conducted to analyze quality of model predictions. First type of calculations was based on experimental data from cold testing unit (VTI experimental testing unit). We calculated distribution of solid phase concentrations along the riser height, velocity fields, radial velocity distributions and upward and downward mass flows of solid phase. Mesh was fine enough to detect dense ring of solid phase near walls and truly predict downward solid phase flow. Second type of simulations was based on DOE (USA Department Of Energy) testing unit experimental data. During coupled (hydrodynamics + chemistry) simulations we determined volume fraction of hydrogen sulfide on outlet, mass fraction of evaporated zinc on outlet, conversion rate and residence times of gas and sorbent.

Verified model was scaled up and implemented in industrial WGC reactor simulation. Reactor was tested in three main regimes: a) 2.1 MPa 844 K b) 2.1 MPa 923 K c) 3 MPa 844 K. Results showed that temperature has the most effect on selectivity shift in direction to side reactions, thus regimes with

temperature 923 K had the most hazardous conditions for sorbent. During first and third regimes, main reaction rate was high enough to be dominant.

Current study contains methods and recommendations for coupled simulations of industrial WGC systems.

Keywords: synthesis gas, desulfurization, CFB, ANSYS.

Введение

Реакторы с циркуляционным кипящим слоем (CFB) уже более 70ти лет применяются на нефтеперерабатывающих предприятиях, но несмотря на обширный накопленный опыт в эксплуатации и расчете подобных систем открытые вопросы до сих пор остаются [1], особенно это касается недавно появившихся систем сухой теплой сероочистки синтез газа (WGC), благодаря которым эффективность парогазового цикла (IGCC) может существенно увеличиться [2], при одновременном уменьшении капитальных и эксплуатационных затрат [3].

Среди эксплуатационных проблем CFB можно выделить: термическую эрозию стенок циклонов и опускных стояков [4; 5; 6]; унос сорбента из циклонов [7]; коррозию металла [8], выбросы вредных веществ [9] и истирание сорбентов [10].

Разнообразие конструктивных решений для систем с CFB рассмотрено в [10], особый интерес для настоящей работы представляют установки с совмещенными адсорбером и регенератором. В проекте Polk Power Station планировалось использовать систему последовательно соединенных реакторов, выполненных в виде загрузочных воронок. Процесс в реакторах проходил дискретно, системы адсорбции и регенерации были разделены задвижками периодического действия. Абсолютно другое, более смелое решение планировалось к запуску на станции Pinon Pine, два реактора с циркуляционным кипящим слоем и периодическим переключением между реактором и регенератором. В [11] рассмотрена система с двумя последовательно соединенными циклонами, позволяющая лучше улавливать частицы сорбента. В [12] представлена поточная схема, включающая в себя и адсорбер и регенератор. За счет гидрозатвора после циклона адсорбера поток кислорода в блок регенерации отсекается от адсорбера. В работе [13] описана еще более интересная система. Преимуществом данной схемы является нисходящая компоновка регенератора. Поток сорбента падает и не требует лишних затрат энергии на подъем. Согласно [14] регенеративная реакция окисления сульфида цинка протекает интенсивнее, чем реакция поглощения сероводорода, и, следовательно, для ее протекания требуется меньше газа, чем на входе в адсорбер, особенно если речь идет о кислородной регенерации. Поэтому, регенератор, в WGC, как правило, меньше

адсорбера. В случае поточной системы подъемная шахта и блок регенерации разделены дополнительным гидрозатвором [12].

Наличие гидрозатворов ставит вопрос о качестве разделения потоков. В виду того, что рабочим телом затвора является дисперсная среда и между частицами есть свободные пространства и порозности могут возникнуть нежелательные течения кислорода из зоны регенерации в циклон адсорбера. В работе [15] приведены методы анализа подобных проблем.

Отдельного внимания заслуживают трудности в области математического моделирования и методов интеграции с программами экономического анализа технологических схем.

Экономическое обоснование IGCC выполняется в таких программах 0D проектирования, как Termoflex [7; 16] и Aspen Plus [17]. Программы представляют собой библиотеки готовых элементов, т.е., например, газификатор рассматривается, как таблица его режимных параметров, определенных в ходе его натурных либо численных испытаний. В работе [18] для детального описания процессов в газификаторе вводился пользовательский код GS, на базе ранних разработок [19]. Системы сухой теплой сероочистки вводятся в эксплуатацию сравнительно недавно [20], режимные таблицы для Termoflex и аналогичных программ не распространены на сегодняшний день и являются предметом исследований.

Численное описание основных химических реакций поглощения сероводорода оксидом цинка в плотном слое для нужд системы сероочистки рассматривались в [21]. Похожие расчеты, но уже для подъемной шахты реактора с циркуляционным кипящим слоем освещались в [22; 23]. Методики опирались на результаты распределения порозности в подъемной шахте [24], определенные методами компьютерной гидродинамики. Таким образом, с целью оптимизации затрат на вычислительные ресурсы задача расчета реактора была разбита на две подзадачи: расчет гидродинамики многофазного потока (получение распределения порозностей твердой фазы в объеме подъемной шахты в установившемся режиме) и расчет гетерогенных реакций с учетом диффузионного сопротивления пористых сорбентов.

В работе [25] говорится о том, что реактор с циркуляционным кипящим слоем сложная пульсирующая система, требующая особого рассмотрения ввиду сложности восходящих и нисходящих потоков твердой фазы. В работе [26] экспериментально определялись расходы восходящих и нисходящих потоков твердой фазы при разных режимах работы установки.

На сегодняшний день есть широкий выбор между программами для численного моделирования гидродинамики многофазных потоков. В работе [27] производилось двумерное моделирование размера и формы пузырей при

продувании газа через слой. Сравнение результатов моделирования в программе OpenFOAM и ANSYS Fluent проводилось на геометрии подъемной шахты и циклона системы с циркуляционным кипящим слоем [28]. В [29] рассчитывались поля скоростей и распределения порозностей в объеме подъемной шахты CFB системы. Особого внимания заслуживает продукт компании Reaction Design ныне модуль ANSYS программа CHEMKIN, позволяющая рассчитывать детальные химические механизмы, состоящие из более чем ста параллельных реакций. В [30] функционал этой программы был соединен с дискретной моделью описывающую движение капель. По данным [31] математические модели заложенные в CHEMKIN не учитывают макрокинетику частиц (диффузионное сопротивление пористого тела). В работе [32] производился одномерный расчет параллельных гетерогенных реакций в условном объеме пористой пластины, омываемой набегающим потоком, расчеты производились в программе DETCHEM, более подробно описанной в [33].

Все озвученные выше подходы относились к сеточным методам, которые сегодня заслуженно пользуются наибольшей популярностью при моделировании процессов тепломассобмена многофазных и сжимающихся потоков. Суть сеточных методов кроется в предварительной искусственной дискретизации пространства с целью возможности преобразования дифференциальных уравнений в алгебраическую форму. Процесс разбиения расчетной области на элементы, объемы или отрезки требует предварительной проверки, чистки либо полного перестроения геометрии изделия, что может привести к разрыву автоматизированной цепочки связывающую конструктив (конструкторская документация, модель изделия) и среду расчета [34], что крайне необходимо в реализации концепции 4к производства и создании цифровых двойников. Для обхода этого недостатка прибегают к использованию бессеточных методов при решении относительного узкого круга задач. По мере решения проблем бессеточных методов область решаемых задач расширяется.

В работе [35] CFB реактор с двумя последовательно соединенными циклонами моделировался с использованием дискретной модели EMMS-DPM, аналогичный реактор моделировался в работе [11] средствами программы MFiX (разработка NETL), которая является одной из пионеров в области применения бессеточных методов для решения многофазных задач с учетом теплообмена и поверхностных реакций. Среди дискретных методов особняком стоит CPFD модель, встроенная программу Barracuda, в работе [36] проводился поверочный нестационарный расчет котла с циркуляционным кипящим слоем. В основе работы обеих программ лежит MP-PIC (Multiphase-particle in cell) метод [37]. По данным [38] результаты, полученные в программах MFiX и ANSYS Fluent схожи.

Образцы и методика эксперимента

Расчет гидродинамики и гетерогенных процессов производился одновременно без разбиения на последовательную схему: сначала определение гидродинамических параметров, затем расчет химических процессов. Использовалась программа ANSYS Fluent. Решались уравнения: неразрывности, сохранения энергии, теплопередачи, Навье-Стокса, турбулентности, сохранения объемной доли твердой фазы, а также сохранения массы компонентов: оксида цинка, сульфида цинка, сероводорода, водорода, монооксида углерода, водяного пара, двуокиси углерода, азота и газообразного цинка. Поток состоял из двух фаз: твердой и газообразной. Двухфазный поток описывался многофазной моделью Эйлера с тензором напряжений для гранулированного потока. Плотность упаковки составляла 0,63. Межфазный теплообмен рассчитывался по модели Ранца-Маршала. Межфазное трение рассчитывалось по закону Шиллера Ньюмана. Реакции подчинялись уравнению действующих масс. Константа скорости реакции определялась экспоненциальным законом Аррениуса. Проводилось три типа расчетов: верификация многофазной модели гидродинамики на результатах холодного стенда с циркуляционным слоем [26], верификация связного расчета (гидродинамика + гетерогенная химия) по данным [3; 23] и прогнозирование процесса сухой сероочистки при наличии побочных реакций. Граничные условия расчетов представлены в таблицах.

Верификация гидродинамики

Концентрация твердой фазы показала монотонное убывание по высоте подъемной шахты (Рис. 1). С увеличением скорости потока газа увеличивается и расход восходящего потока, таким образом, больше частиц долетает до верха подъемной шахты.

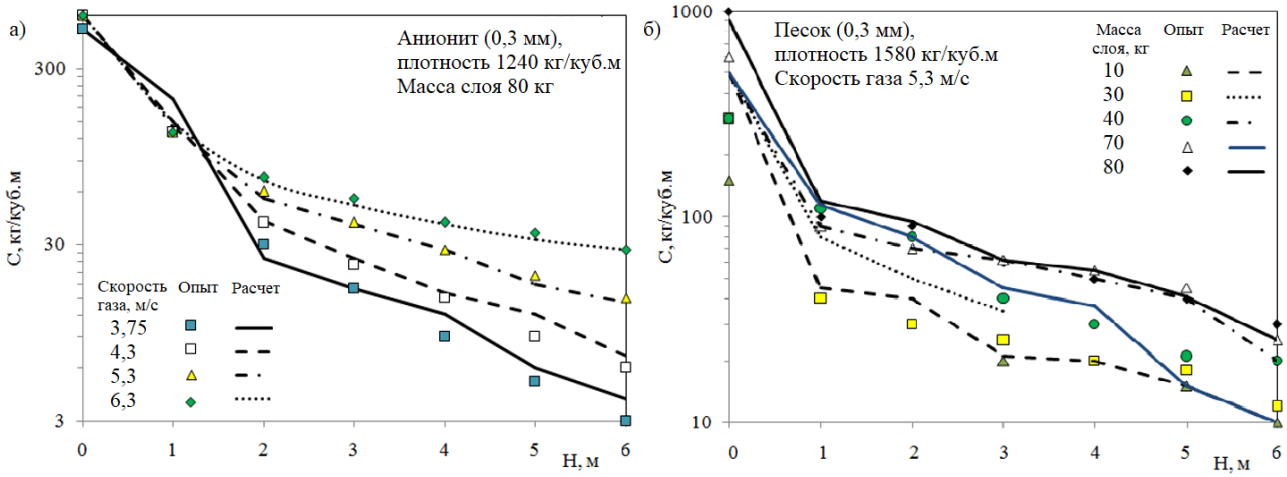


Рисунок 1 – Влияние скорости (а) массы слоя (б) на распределение концентрации твердой фазы по высоте

До отметки в один метр различия между режимами не наблюдается, так как масса слоя неизменна (рис. 1а). После этой отметки начинает усиливаться вклад нисходящих потоков, твердая фаза осыпается в десять раз интенсивнее при скорости 3,75 м/с в сравнении с режимом со скоростью 6,3 м/с.

Увеличение массы слоя приводит к поднятию уровня концентрации без изменения наклона кривой. Различие в 50 кг/куб.м между самым тяжелым и самым легким слоем сохраняется на протяжении всей высоты подъемной шахты. Изменение массы слоя так же не изменило монотонность убывания концентрации (рис. 1б).

Влияние материала аналогично массе слоя не вносит корректировок в форму кривой концентрации, меняя лишь ее уровень. Уровень кривой концентрации песка выше уровня кривой анионита, пропорционально разнице плотностей.

Аналогичная ситуация наблюдается и с удельным массовым расходом твердой фазы. Увеличение уровня кривой концентрации происходит пропорционально плотностям (Разница между концентрациями при H=3 м: 25/21=1,25 и разница между плотностями песка и анионита, использованных в опытах 1580/1240=1,27).

Скорость газа максимальна на оси и минимальна (равна нулю) на стенке. Снижение скорости приводит к возникновению нисходящего потока сорбента вблизи стенки. Скорость нисходящего потока распределяется неравномерно, и имеет экстремум. На оси она положительна и максимальна по модулю. У стенки направление скорости отрицательно, но ввиду отсутствия сопротивления со стороны газа (скорость газа у стенки нулевая), по модулю скорость твердой фазы тоже максимальна. Вблизи стенки наблюдается скачек концентрации твердой фазы, объясняемый низкой по модулю скоростью потока твердой фазы.

Верификация химического решателя

В работах [23; 3; 24] производился анализ зависимости распределения порозности по высоте реактора от удельных расходов сорбента (рис. 2). Для данного типа реакторов распределение порозности по высоте обычно принимает U-образную форму. Выделяют зоны: ускорения, стабилизации и зону выхода. В первой и в третьей зонах обычно наблюдается уплотнение потока, когда в установившейся зоне поток более разрежен. С возрастанием удельного расхода сорбента разница между порозностями в зонах увеличивается. Мы преобразовали известные графики к расчетному виду, далее полученные аппроксимационные формулы были использованы в ANSYS Fluent для расчета некоторых сложных режимов работы реактора, требующих информации о потоке на всей длине реактора. Для более простых режимов (высокое давление, высокий расход сорбента, очистка на уровне одного – двух метров) использовалась полноценная многофазная модель Эйлера с гетерогенными реакциями.

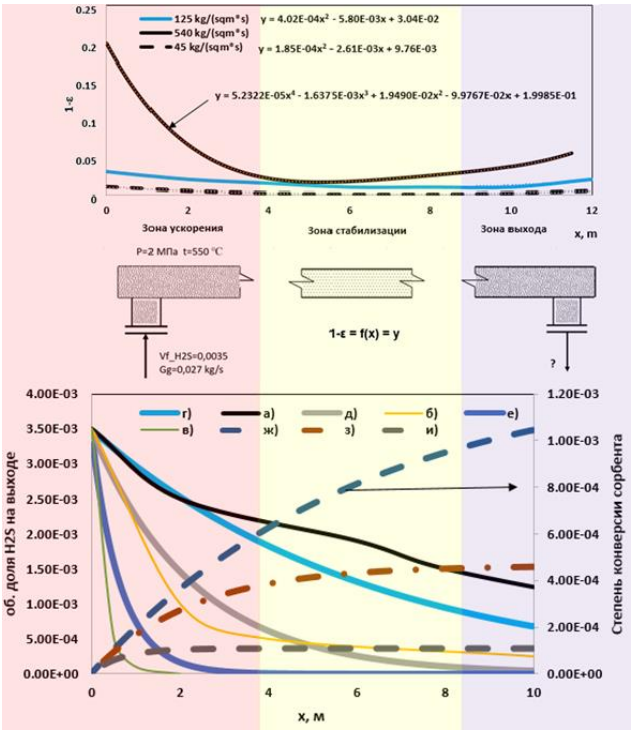


Рисунок 2 – Распределение объемной доли твердой фазы по высоте реактора и динамика очистки и конверсии сорбента в реакторе

Расчеты реактора при удельных расходах 45, 125 и 540 кг/(кв.м*с) (кривые г) д) е) (2) согласуются с данными [23] при аналогичных условиях (кривые а) б) в)). Ввиду того, что расход сорбента уменьшается, его конверсия ускоряется, данные по конверсии сорбента для удельных расходов приведены на кривых ж) з) и).

Результаты и обсуждение

За счет высокой концентрации сорбента в реакторе (кривая в) (680 кг/(кв.м*с)), очистка газа от сероводорода осуществляется уже на первом метре реактора. Расчетные данные (кривая а) согласуются с расчетными данными [3] (кривая б), которые отличаются не более чем на 5% от экспериментальных (неопубликованных). В настоящем расчете не учитывались особенности распределительной решетки аппарата, поток газа подавался через все сечение трубы, за счет чего скорость твердой фазы (кривая д) незначительно (овалом выделена область ускорения частиц) отличалась от скорости газообразной фазы (кривая г). Поэтому время пребывания газа и сорбента в реакторе хоть и отличались, но незначительно (рециркуляции сорбента на участке не наблюдалось). А частицы, достигнувшие выхода участка, теряли оксида цинка ровно столько, сколько поглощалось сероводорода в газе. В случае рециркуляции сорбента на участке, степень конверсии выносимых из участка частиц была бы выше.

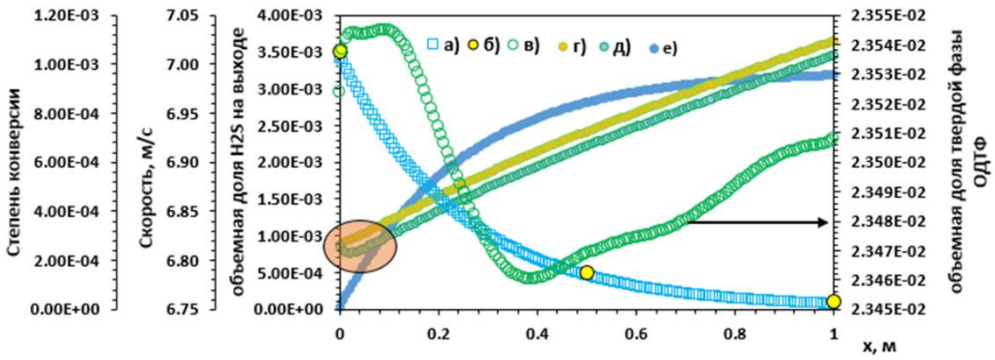


Рисунок 3 – Сводный график процесса очистки без учета побочных реакций

Для прогнозирования воздействия побочных реакций на работу системы сухой сероочистки были проведены расчеты в трех режимах (а) б) в)). Подробная информация о граничных условиях режимов приведена в таблице режимов. Расчеты показали, что режим в) может обеспечить наилучшую очистку от сероводорода. Это достигается за счет увеличения давления. Температура в отличии от давления приводит к более резкому росту скоростей побочных реакций. О чем можно судить по степени разрушения сорбента в связи с его восстановлением. Доминирования целевой реакции не было зафиксировано ни в одном процессе. В режиме б) побочные реакции восстановления оксида цинка в водороде 4-5 раз быстрее основной. В режиме в) лидерство побочных реакций сохраняется, но уже не так ярко, как наименее благоприятном режиме б). Все реакции процесса являются экзотермическими и чувствительными к температуре, поэтому в режиме б) наблюдается наибольший выброс тепловой энергии. Реакции восстановления оксида цинка в монооксиде углерода вносят незначительный вклад в процесс.

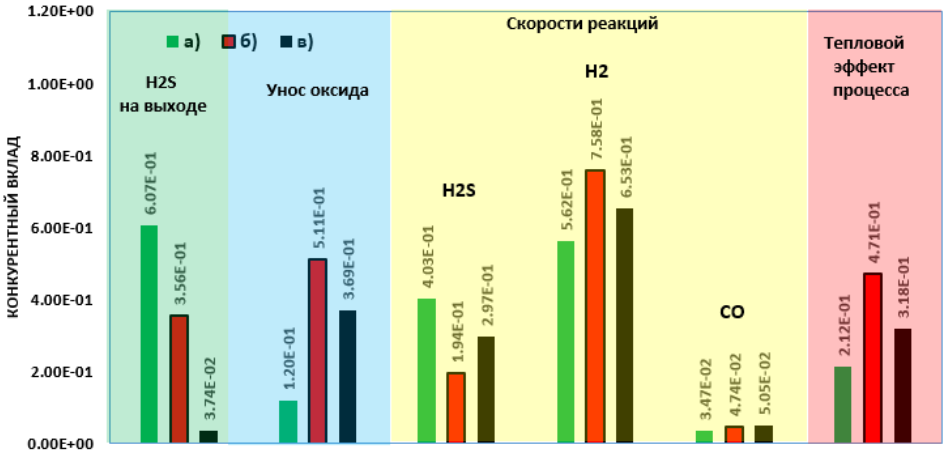


Рисунок 4 – Прогноз конкурентного вклада выходных параметров в ходе процесса сухой сероочистки синтез газа. Режимы: а) 2,1 Мпа 844 К б) 2,1 Мпа 923 К в) 3,0 Мпа 844 К.

Повышение давления ввиду своей безопасности для сорбента способствует более интенсивной очистке газа от сероводорода (рис.4). Несмотря на доминирование целевой реакции, побочные реакции, как и целевая при увеличенном давлении растут, следовательно, и степень разрушения сорбента (массовая доля металлического цинка), зафиксированная у частиц на выходе из реактора, возросла до уровня неблагоприятного высокотемпературного режима б).

Во всех режимах доминировала реакция восстановления оксида цинка в водороде. Второе место стабильно занимала целевая реакция сульфидирования оксида цинка в сероводороде. Пик побочной реакции в водороде наблюдается во втором режиме. Тепловой эффект процесса полностью огибает кривую скорости побочной реакции в водороде.

Как уже отмечалось ранее в настоящей главе, водород наиболее опасный компонент в синтез газе для сорбентов на основе оксида цинка. Поэтому, наилучшим решением для сероочистки был бы синтез газ с минимальным содержанием водорода. И такой газ есть, его можно получить при газификации твердого топлива с использованием технологии Oxy-Fuel.

Таблица 1–Состав синтез газа полученного по технологии Oxy-Fuel

Компонент	H2	CO	H2O	CO2	H2S	N2
Объемная доля, %	5	20	10	20	0,008	45

В поточном реакторе наблюдается радиальная неравномерность степени очистки синтез газа от сероводорода. Вдоль стенок зарегистрирована зона возможного проскока сероводорода. Более глубокая очистка наблюдается при работе с синтез газом, полученным Oxy-Fuel газификацией.

Радиальная неравномерность имеет нелинейный характер. Вблизи стенки наблюдается наилучшая степень очистки газа на всех рассмотренных отметках.

Неравномерность очистки повторяет графики радиального распределения объемной доли твердой фазы. Кольцо уплотненного потока приводит к повышению концентрации твердого вещества, и как следствие увеличению площади поверхности раздела фаз, что приводит к интенсификации гетерогенных процессов в данной области.

Результаты расчетов показывают, что использование технологии Oxy-Fuel может значительно сократить суммарную скорость реакции побочных процессов, и почти на 70% снизить невосполнимые потери сорбента, связанные с его восстановлением и уносом. Снижение скорости реакции восстановления оксида цинка в водороде приводит к смещению конкурентного вклада в сторону целевой реакции, что улучшает качество очистки.

Заключение

1) Выбранная расчетная модель подтвердили свою адекватность при сравнении результатов расчетов по ряду параметров в широком диапазоне режимов работы установки в холодном режиме, при атмосферном давлении. Были обнаружены сходимости при оценке концентраций твердой фазы вдоль высоты реактора при переменных скоростях, массах слоя и плотностях гранул. Расчет точно определил удельные массовые потоки твердой фазы для шести расчетных случаев. Расчетным путем был подтвержден эффект скачка объемной доли твердой фазы вблизи пристеночной зоны.

2) Проведено сравнение результатов связных расчетов (гидродинамика + гетерогенная химия) при разных удельных расходах твердой фазы с данными [23] для реактора среднего давления. Проведено сравнение результатов связных расчетов с данными [3].

3) Прогноз показал, что повышение температуры пагубно влияет на стойкость сорбента за счет доминирования побочных реакций. Но при повышении давления конкурентный вклад не смещается в сторону побочных реакций при общем повышении интенсивности процесса.

4) Расчетным путем было определено, что водород является наиболее нежелательным компонентом синтез газа при его очистке. Поэтому перед очисткой рекомендуется использовать технологию газификации Oxy-Fuel, для получения наиболее безопасного состава газа, не содержащего водород. А после очистки, для увеличения калорийности газа применять шифтр реактор, для восстановления H2:CO.

5) При помощи модели было проведено сравнение четырех типов синтез газов, характерных для процессов газификации: GE, KRW и Texaco (кислородный и воздушный). Синтез газ процесса GE показал наивысшие критические температуры, что характеризует этот процесс как наиболее безопасный для сорбента и предполагает наиболее широкий рабочий диапазон температур. Также, благодаря высокому содержанию сероводорода в газе GE эффективность очистки наивысшая. Например, для процесса GE параметр отношения расхода восстановленного цинка приведенного к расходу сероводорода составляет не более 0,01, в то время как для газа Texaco этот же параметр в 5 раз ниже, то есть, восстанавливается и безвозвратно уносится оксида цинка в 5 раз больше.

Библиографический список

1. Reddy Karri S. B. Erosion in Second Stage Cyclones: Effects Of Cyclone Length And Outlet Gas Velocity / S. B. Reddy Karri, R. Cocco, T. M. Knowlton // Proceedings of the International Conference on Circulating Fluidized Beds and Fluidization Technology : CFB-10. – Berlin, 2011. – P. 1–8.

2. Abaimov N. A. Development of a model of entrained flow coal gasification and study of aerodynamic mechanisms of action on gasifier operation / N. A. Abaimov, A. F. Ryzhkov // Thermal Engineering. – 2015. – Vol. 62, Iss. 11. – P. 767–772.
3. Monazam E. R. Fuel Gas Clean-up in a Transport Reactor: Model Development and Analysis / E. R. Monazam, L. J. Shadle // 18th International Conference on Fluidized Bed Combustion. – London, 2005. – P. 409–416.
4. CFD simulation of circulating fluidized bed boiler 30 MW: Effect of primary and secondary air distribution on fluidization behavior / R. M. Wijayanto, B. Sudarmanta, A. Syaifudin, G. Nugroho. – DOI 10.1063/1.5046214 // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 1983. – P. 020018.
5. Koksharev O. M. 3D CFD simulation of aerodynamics of a 406 MWt CFB boiler / O. M. Koksharev, A. V. Gil, V. M. Lebedev // International Youth Scientific Conference «Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy Equipment» : HMTTSC 2017. – Surabaya, 2018. – Vol. 110. – P. 1–5.
6. Numerical investigation of effects of inner cone on flow field, performance and erosion rate of cyclone separators / F. Parvaz, S. H. Hosseini, K. Elsayed, G. Ahmadi // Separation and Purification Technology. – 2018. – Vol. 201. – P. 223–237.
7. Wang T. Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) Technologies / T. Wang, G. Stiegel. – [Berlin] : Woodhead Publishing, 2017. – 928 p.
8. Gong Y. Corrosion evaluation of one dry desulfurization equipment – Circulating fluidized bed boiler / Y. Gong , Z. G. Yang // Materials and Design. – 2011. – Vol. 32, Iss. 2. – P. 671–681.
9. Study on Powder Coke Combustion and Pollution Emission Characteristics of Fluidized Bed Boilers / C. Yang, H. Wu, D. Kangjie [et al.] // Open Access Journal. – 2019. – Vol. 12, Iss. 8. – P. 1–18.
10. Yang W. C. Handbook for fluidization and fluid-particle systems / W. C. Yang. – New York : Marcel Dekker, 2003. – 861 p.
11. Li T. MFIX simulation of NETL/PSRI challenge problem of circulating fluidized bed / T. Li, J. F. Dietiker, M. Shahnam // Chemical Engineering Science. – 2012. – Vol. 84. – P. 746–760.
12. Breault R. W. Handbook of Chemical Looping Technology / R. W. Breault. – Weinheim : Wiley-VCH, 2019. – 488 p.
13. Ghadirian E. CFD simulation of gas and particle flow and a carbon capture process using a circulating fluidized bed (CFB) reacting loop / E. Ghadirian, J. Abbasian, H. Arastoopour // Powder Technology. – 2019. –Vol. 344, Iss. 15. – P. 27–35.
14. Sofekun O. A. High-Temperature Oxidation of Zinc Sulfide: Kinetic Modeling under Conditions of Strict Kinetic Control / O. A. Sofekun, L. K. Doraiswamy // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 1996. – Vol. 35, Iss. 9. – P. 3163–3170.
15. Basu P. An Analysis of Loop Seal Operations in a Circulating Fluidized Bed / P. Basu, L. Cheng // Chemical Engineering Research and Design. – 2000. – Vol. 78, Iss. 7. – P. 991–998.
16. Ryzhkov A. Technological solutions for an advanced IGCC plant / A. Ryzhkov, T. Bogatova, S. Gordeev // Fuel. – 2017. – Vol. 214. – P. 63–72.

17. Ng K. S. Decarbonised coal energy system advancement through CO_2 utilisation and polygeneration / K. S. Ng, N. Zhang, J. Sadhukhan // Clean Technologies and Environmental Policy. – 2012. – Vol. 14, Iss. 3. – P. 443–451.
18. Giuffrida A. Thermodynamic analysis of air-blown gasification for IGCC application / A. Giuffrida, M. Romano, G. Lozza // Applied Energy. – 2011. – Vol. 88, Iss. 11. – P. 3949–3958.
19. Predicting the Ultimate Performance of Advanced Power Cycles Based on Very High Temperature Gas Turbine Engines / P. Chiesa, S. Consonni, G. Lozza, E. Macchi // ASME 1993 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition. – [S. l.], 1993. – P. 1–16.
20. RTI Warm Syngas Cleanup Operational Testing at Tampa Electric Company's Polk 1 IGCC Site. – 25 p. – URL: https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/event-proceedings/2017/crosscutting/-20170320-Track-C/20170320_1530C_Presentation_FE0026622_RTI.pdf (accessed: 13.05.2021).
21. Konttinen J. T. Modeling of Sulfided Zinc Titanate Regeneration in a Fluidized-Bed Reactor / J. T. Konttinen, C. A. P. Zevenhoven, M. M. Hupa // Scale-Up of the Solid Conversion Model. Industrial and Engineering Chemistry Research. –1997. – Vol. 36, Iss. 12. – P. 5439–5446.
22. Monazam E. R. Modeling and analysis of S-sorption with ZnO in a transport reactor / E. R. Monazam, L. J. Shadle, D. A. Berry // Chemical Engineering Science. – 2008. – Vol. 63, Iss. 10. – P. 2614–2623.
23. Settino J. Model of a chemical looping process for hot gas desulfurization in power plants / J. Settino // Energy Procedia. – 2015. – Vol. 82. – P. 908–914.
24. Monazam E. R. Analysis of the acceleration region in a CFB riser operating above fast fluidization velocities / E. R. Monazam, L. J. Shadle // Industrial and Engineering Chemistry Research. – 2008. – Vol. 47, Iss. 21. – P. 8423–8429.
25. Experimental research on the unstable performances of parallel external loops in the circulating fluidized bed / R. Cai, M. Zhang, X. Mo [et al.] // Chemical Engineering Research and Design. – 2018. – Vol. 139. – P. 1–11.
26. Development of the Circulating Fluidized Bed Combustion Technology : Studies of CFB Technology at VTI and the Justification for its Use in Russia / G. A. Ryabov // Power Technology and Engineering. – 2016. – Vol. 50. – P. 413–418.
27. Liu Y. CFD modeling of bubbling fluidized beds using OpenFOAM: Model validation and comparison of TVD differencing schemes / Y. Liu, O. Hinrichsen // Computers & Chemical Engineering. – 2014. – Vol. 69. – P. 75–88.
28. Nikku M. Comparison of Ansys Fluent and Openfoam in Simulation of Circulating Fluidized Bed Riser / M. Nikku, P. Jalali, T. Hyppänen // Proceedings of the 12th International Conference on Fluidized Bed Technology. – [S. l.], 2017. – P. 337–344.
29. CPFD simulation of circulating fluidized bed risers / C. Chen, J. Werter, S. Heinrich [et al.] // Powder Technology. – 2013. – Vol. 235. – P. 238–247.
30. Irfan M. A Front Tracking Method for Particle-Resolved Simulation of Evaporation and Combustion of a Fuel Droplet / M. Irfan, M. Muradoglu // Computers & Fluids. – 2018. – Vol. 174. – P. 283–299.
31. Marin G. B. Advances in Chemical Engineering / G. B. Marin. – New York :

Academic Press, 2014. – 303 p.
32. Numerical modeling of stagnation-flows on porous catalytic surfaces: CO oxidation on Rh/Al_2O_3 / H. Karadeniz, C. Karakaya, S. Tischer, O. Deutschmann // Chemical Engineering Science. – 2013. – Vol. 104. – P. 899–907.
33. Chapter Two – Spatial Resolution of Species and Temperature Profiles in Catalytic Reactors: In-Situ Sampling Techniques and CFD Modeling // Advances in Chemical Engineering. – 2014. – Vol. 45. – P. 41–95.
34. Liu G. R. Mesh Free Methods. Moving Beyond the Finite Element Method / G. R. Liu. – Boca Raton : CRC Press, 2003. – 691 p.
35. Virtual process engineering on a three-dimensional circulating fluidized bed with multiscale parallel computation / J. Xu, H. Liu, S. Hu // Journal of Advanced Manufacturing and Processing. – 2019. – Vol. 1, Iss. 1/2. – P. 10014.
36. Lattice Boltzmann based discrete simulation for gas-solid fluidization / L. Wang, B. Zhang, X. Wang [et al.] // Chemical Engineering Science. – 2013. – Vol. 101. – P. 228–239.
37. Andrews M. J. The Multiphase Particle-in-Cell (MP-PiC) Method for Dense Particulate Flows / M. J. Andrews, P. J. O'Rourke // International Journal of Multiphase Flow. – 1996. – Vol. 22, Iss. 2. – P. 379–402.
38. CFD simulation of fluidized bed reactors for polyolefin production – A review / M. J. H. Khan, M. Hussain, Z. Mansourpour [et al.] // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2014. – Vol. 20, Iss. 6. – P. 3919–3946.

УДК 621.039.766

Никитенко Е.И., Ромадов Н.Н., Кружалов А.В., Екидин А.А.

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ПРОБ ГАЗООБРАЗНЫХ ВЫБРОСОВ ПРОМЫШЛЕННОЙ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДНОГО СОСТАВА

Аннотация. Представлены результаты определения объемной активности инертных радиоактивных газов (далее – ИРГ) в счетных образцах, полученных из выбросов промышленной реакторной установки (далее – ПРУ). Подготовка счетных образцов выполнялась двумя методами концентрирования: криогенным концентрированием и концентрированием при давлении 0,7 МПа. Отбор проб для подготовки счетного образца каждым методом проводился одновременно по параллельным пробоотборным линиям. Значения активности изотопов ИРГ в счетных образцах при одновременном использовании двух методов концентрирования отличаются в 3-9 раз, в зависимости от радионуклида. Результаты указывают на то, что подготовка счетного образца методом криогенного концентрирования позволяет получить более высокий коэффициент концентрирования, однако метод имеет ряд недостатков.

Ключевые слова: криогенное концентрирование, сосуд Маринелли, инертные радиоактивные газы, газообразные выбросы, аргон, криптон, ксенон, промышленный ядерный реактор.

Abstract. Experimental results of radioactive noble gases volumetric activity determination in the emissions of an industrial reactor are presented. The preparation of counting samples was carried out by two different concentration methods: cryogenic concentration and concentration at a pressure of 0.7 MPa. Sampling for the preparation of the counting sample by each method was carried out simultaneously. The values of RNG isotopes activity in counting samples with the simultaneous use of two methods of concentration differ 3-9 times, depending on the radionuclide. The results indicate that the preparation of the counting sample by the cryogenic concentration method allows obtaining a higher concentration coefficient, but the method has disadvantages in the form of a loss of the investigated volume of the gas mixture at the stage of the end of sampling.

Keywords: volumetric activity, cryogenic concentration, Marinelli vessel, inert radioactive gases, gaseous emissions, argon, krypton, xenon, industrial nuclear reactor.

Введение

В процессе эксплуатации ПРУ образуются газоаэрозольные радиоактивные отходы. Несмотря на предварительную очистку, часть аэрозолей, газов и паров поступают в окружающую среду и могут формировать радиационное воздействие на персонал предприятия и население, проживающее на близлежащей территории. В режиме нормальной эксплуатации газообразные выбросы реакторных установок различного типа включают радиоактивные изотопы криптона, ксенона и один радиоизотоп аргона. Изотопы криптона и ксенона образуются в результате деления ядерного топлива. При наличии дефекта, типа газовой неплотности, газообразные

продукты деления поступают за пределы тепловыделяющего элемента в теплоноситель и далее в систему вентиляции реакторной установки. Изотоп ^{41}Ar образуется в результате активации присутствующего в воздухе стабильного аргона. Для всех ИРГ характерен небольшой период полураспада – менее нескольких суток. Исключение составляет ^{85}Kr с периодом полураспада 10,77 лет.

Вклад ИРГ в суммарную активность выброса для различных реакторных установок находится в интервале от 39% до 99% [1, 2]. Вклад в облучение критической группы населения выбросов ИРГ различными реакторными установками находится от пренебрежимо малого до 60% [3]. В выбросах реакторных установок между отдельными изотопами ИРГ может наблюдаться корреляционные связи. Формирующие отдельные устойчивые группы [4]:

– ^{85m}Kr, ^{87}Kr, ^{88}Kr;
– ^{133}Xe, ^{135}Xe, ^{135m}Xe, ^{137}Xe, ^{138}Xe.

Наличие таких связей позволяет проводить оптимизацию систем мониторинга выброса ИРГ для устойчивых груп. Менее выраженные связи с другими ИРГ для: ^{41}Ar, ^{131m}Xe, ^{133m}Xe, ^{89}Kr, ^{85}Kr.

МАГАТЭ рассматривает 12 изотопов инертных газов, как фактор радиационного воздействия на окружающую среду при эксплуатации АЭС: ^{41}Ar, ^{85}Kr, ^{85m}Kr, ^{87}Kr, ^{88}Kr, ^{131m}Xe, ^{133}Xe, ^{133m}Xe, ^{135}Xe, ^{135m}Xe, ^{137}Xe, ^{138}Xe [5]. В России, согласно распоряжению правительства РФ от 08.07.2015 г, №1316-р, перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды содержит 13 изотопов инертных газов: ^{41}Ar, ^{85}Kr, ^{85m}Kr, ^{87}Kr, ^{88}Kr, ^{89}Kr,^{127}Xe, ^{133}Xe, ^{133m}Xe, ^{135}Xe, ^{135m}Xe, ^{137}Xe, ^{138}Xe.

Для корректного определения радионуклидного состава ИРГ, выбрасываемых при нормальной эксплуатации ПРУ, необходимо использовать методы, имеющие низкий порог измерения. При использовании метода отбора проб газовоздушной смеси без концентрирования, нижний порог измерения (далее – НПИ) ИРГ определяется чувствительностью детектора, в данном случае гамма-спектрометра с кристаллом из особо чистого германия (далее – ОЧГ). Одним из вариантов понижения НПИ является предварительное концентрирование пробы на этапе пробоотбора.

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью контролировать радионуклидный состав выбросов газообразных радиоактивных отходов в соответствии с действующим законодательством для обеспечения безопасной эксплуатации ПРУ. Не зная радионуклидного состава выбросов ИРГ невозможно сделать адекватных оценок дозовых нагрузок как на персонал, так и на население. Полученные в процессе исследования данные помогут определить и сформулировать требования к системе контроля ИРГ, удовлетворяющей требованиям современного природоохранного законодательства.

Образцы и методика эксперимента

Для получения достоверных результатов измерений активности отдельных радионуклидов в газообразных выбросах необходимо использовать чувствительные методы, а при их отсутствии проводить предварительное концентрирование газа.

Количественный, качественный состав ИРГ в газовых выбросах определялись с использованием двух методов:

Криогенное концентрирование. Криогенное замораживание газовой смеси в азотных ловушках (далее – АЛ), заполненных силикагелем, с последующим измерением на гамма-спектрометре ГАММА-1П с полупроводниковым ОЧГ-детектором. Калибровку гамма-спектрометра проводили по модельной пробе на основе радионуклидов ^{57}Co, ^{60}C, ^{137}Cs, ^{241}Am, ^{228}Th, геометрия модельной пробы соответствует геометрии азотной ловушки. Отбор газовой смеси на азотные ловушки осуществляли согласно схеме, приведенной на рисунке 1.

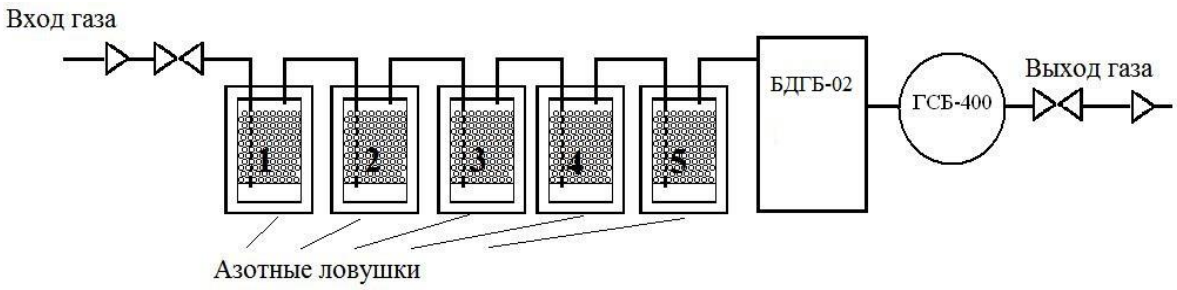


Рисунок 1 – Схема отбора пробы методом криогенного концентрирования

Проточная камера БДГБ-02 использовалась для подтверждения улавливания ИРГ в каскаде ловушек. Пробоотбор на каскад АЛ прекращали при превышении измеренных перед началом пробоотбора фоновых значений скорости счета камеры. Для контроля объема, прокачиваемого воздуха использовался газовый счетчик ГСБ-400.

Использование ловушек при температуре жидкого азота ($t_{кип}$= минус 196 °С) с наполнителем из пористой структуры и с высокой удельной поверхностью позволяет сконцентрировать ИРГ. В трех последовательно соединенных криогенных ловушках изотопы ксенона ($t_{кип}$= минус 109 °С), криптона ($t_{кип}$= минус 153 °С) вымораживаются на 100%, и аргона ($t_{кип}$= минус 186 °С) на 90% [6].

После отбора пробы каждая из пяти АЛ поочередно измерялась на гамма-спектрометре. Активность в пяти АЛ рассчитывалась по формуле:

$$A_{\Sigma АЛ} = \sum_{i=1}^{n} A_{АЛ1..5}, \quad (1)$$

где $A_{АЛ1..5}$ – активность i-радионуклида в каждой из пяти АЛ.

Концентрирование при давлении 0,7 МПа. Отбор проб выполняли с помощью сосуда Маринелли объемом 3,4 л, изготовленного из нержавеющей стали толщиной 1,5 мм [7].

Между сосудом Маринелли и импульсной пробоотборной трубкой устанавливался фильтродержатель с двумя фильтрами АФА-РМП-20 для очистки газоаэрозольной смеси из сбросной трубы ПРУ от аэрозолей. К выходу аэрозольного фильтра подключался счетчик ГСБ и проточная камера БДГБ-02, для контроля заполнения пробоотборной линии исследуемой средой. К выходу камеры при помощи вакуумных шлангов подключался всас поршневого воздушного компрессора. Газовый счетчик использовался для контроля объема газовой смеси, закачиваемой в сосуд Маринелли с установленной на него запорной арматурой и манометром для контроля давления. Схема пробоотборного стенда приведена на рисунке 2.

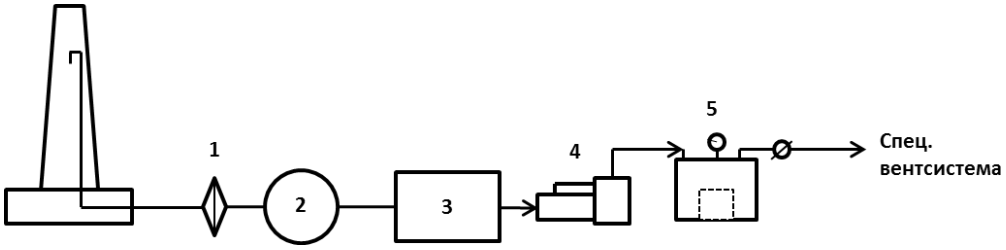


Рисунок 2 – Схема стенда для отбора газовой смеси под давлением:
1-аэрозольный фильтр АФА-РМП-20; 2 – газовый счетчик ГСБ;
3 – проточная камера БДГБ-02, 4 – компрессор;
5 – сосуд Маринелли с запорной арматурой и манометром

Контроль корректности определения активности в счетном образце проводился с использованием энергетической калибровки и поправки на эффективность регистрации излучения на спектрометре с полупроводниковым ОЧГ детектором. Для этого применялась объемная мера активности специального назначения (далее – ОМАСН), изготовленная в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» (г. Санкт-Петербург). Геометрия модельной пробы соответствует геометрии сосуда Маринелли. Проба заполнена гранулами, пропитанными смесью радионуклидов, и имеет насыпную плотность 0,0083 г/см^3. Внешний вид сосуда Маринелли и ОМАСН представлен на рисунке 3.

Рисунок 3 – Внешний вид сосуда Маринелли и объемной меры активности специального назначения

При отборе пробы методом концентрирования под давлением, газовоздушная смесь закачивалась в сосуд Маринелли через аэрозольный фильтр, газовый счетчик и камеру БДГБ-02. Аэрозольный фильтр необходим для предотвращения загрязнения внутреннего объема сосуда Маринелли радиоактивными аэрозолями. Камера БДГБ-02 использовалась для контроля заполнения пробоотборной линии исследуемым объемом. Сосуд Маринелли заполняли до давления 0,7 МПа.

Результаты и обсуждение

Была проведена серия из 10 отборов проб. Газовая смесь отбиралась из сбросной трубы системы газоочистки промышленного ядерного реактора двумя методами параллельно. Пробоотборные линии представляют собой две трубки из нержавеющей стали с внутренним диаметром 8 мм, оголовки трубок направлены навстречу газовому потоку внутри сбросной трубы ПРУ на высоте 30 метров.

Результаты измерения счетных образцов, полученных двумя методами приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты измерения счетных образцов, полученных методами концентрирования под давлением 0,7 МПа и криогенным методом, Бк

Проба, №	Криогенное концентрирование						
	^{41}A	^{85m}Kr	^{87}Kr	^{88}Kr	^{133}Xe	^{135}Xe	^{138}Xe
1	526	32	29	58	205	172	15
2	446	24	27	50	150	107	<НПИ
3	690	33	39	75	235	206	23
4	698	46	42	90	242	225	28
5	533	34	32	67	232	212	18
6	299	14	14	29	79	88	<НПИ
7	843	59	40	73	300	310	33
8	644	35	34	64	240	219	18
9	36	6	<НПИ	<НПИ	65	43	<НПИ
10	<НПИ	<НПИ	<НПИ	<НПИ	206	<НПИ	<НПИ
Проба, №	Концентрирование под давлением 0,7 МПа						
	^{41}A	^{85m}Kr	^{87}Kr	^{88}Kr	^{133}Xe	^{135}Xe	^{138}Xe
1	140	6	<НПИ	13	64	53	<НПИ
2	123	<НПИ	<НПИ	11	<НПИ	33	<НПИ
3	177	<НПИ	12	<НПИ	77	64	4
4	186	<НПИ	9	23	75	70	5
5	155	6	<НПИ	18	73	66	<НПИ
6	104	<НПИ	<НПИ	<НПИ	24	<НПИ	<НПИ
7	254	11	11	26	93	89	6
8	148	6	8	<НПИ	74	68	<НПИ
9	12	<НПИ	<НПИ	<НПИ	32	10	<НПИ
10	<НПИ	<НПИ	<НПИ	<НПИ	64	<НПИ	<НПИ

Из таблицы 1 видно, что в пробах, полученных методом концентрирования под давлением, с меньшей эффективностью, чем при использовании метода криогенного концентрирования, идентифицируются ^{85m}Kr, ^{87}Kr, ^{88}Kr, ^{138}Xe, что обусловлено низким содержанием этих радионуклидов в выбрасываемой газовой смеси.

В таблице 2 приведены усредненные по десяти отборам проб результаты измерения на гамма-спектрометре счетных образцов, полученных методом криогенного концентрирования и методом концентрирования под избыточным давлением.

Таблица 2 – Усредненные по десяти отборам проб результаты измерения на гамма-спектрометре счетных образцов, полученных методом криогенного концентрирования и методом концентрирования под избыточным давлением, Бк

Радионуклид	Метод концентрирования		Отношение Акр / Адавл
	Криогенный	Под давлением 0,7 Мпа	
^{41}Ar	471,5	129,9	3,6
^{85m}Kr	28,3	3,7	7,6
^{87}Kr	25,7	4,0	6,5
^{88}Kr	50,6	9,1	5,6
^{133}Xe	195,4	57,6	3,4
^{135}Xe	158,2	45,3	3,5
^{138}Xe	13,5	1,5	8,9

Из таблицы видно, что активность ИРГ, измеряемая в пяти АЛ, в среднем в 3 – 9 раз больше активности, измеряемой в сосуде Маринелли с закачанной в него газовоздушной смесью при давлении 0,7 МПа.

По данным таблицы 1 были произведены расчеты объемной активности в пробе. Объем прокачанного для АЛ и закачанного под давлением в сосуд Маринелли воздуха определялись по газовому счетчику ГСБ. Результаты расчета объемных активностей ИРГ в пробах приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчета объемных активностей ИРГ в пробах, Бк/дм^3

Проба, №	Метод криогенного концетрирования						
	^{41}A	^{85m}Kr	^{87}Kr	^{88}Kr	^{133}Xe	^{135}Xe	^{138}Xe
1	3,9	0,2	0,2	0,5	1,5	1,4	0,1
2	3,3	0,2	0,2	0,4	1,1	0,8	<НПИ
3	5,1	0,3	0,3	0,6	1,7	1,6	0,2
4	5,2	0,4	0,3	0,7	1,7	1,8	0,2
5	3,9	0,3	0,2	0,5	1,7	1,7	0,1
6	2,2	0,1	0,1	0,2	0,6	0,7	<НПИ
7	6,2	0,5	0,3	0,6	2,1	2,4	0,3
8	4,8	0,3	0,3	0,5	1,7	1,7	0,1
9	0,3	<НПИ	<НПИ	<НПИ	0,5	0,3	<НПИ
10	<НПИ	<НПИ	<НПИ	<НПИ	1,5	<НПИ	<НПИ

Продолжение таблицы 3

Проба, №	Концентрирование под давлением 0,7 Мпа						
	^{41}A	^{85m}Kr	^{87}Kr	^{88}Kr	^{133}Xe	^{135}Xe	^{138}Xe
1	6,0	0,3	<НПИ	0,6	2,7	2,3	<НПИ
2	5,3	<НПИ	<НПИ	0,5	<НПИ	1,4	<НПИ
3	7,6	<НПИ	0,5	<НПИ	3,3	2,7	0,2
4	8,0	0,4	0,4	1,0	3,2	3,0	0,2
5	6,6	0,3	<НПИ	0,8	3,1	2,8	<НПИ
6	4,5	<НПИ	<НПИ	<НПИ	1,0	<НПИ	<НПИ
7	10,9	0,5	0,4	1,1	3,9	3,8	0,3
8	6,3	0,3	0,3	<НПИ	3,1	2,9	<НПИ
9	0,5	<НПИ	<НПИ	<НПИ	1,4	0,4	<НПИ
10	<НПИ	<НПИ	<НПИ	<НПИ	2,7	<НПИ	<НПИ

Данные таблицы 3 показывают, что результаты, полученные при расчете объемной активности в сбросной трубе с использованием двух методов концентрирования при пробоотборе, показывают в среднем меньшую на 31% объемную активность при использовании криогенного метода концентрирования.

Это может быть объяснено потерями полезного объема прокачиваемой газовой смеси на этапе отсоединения азотных ловушек и их герметизации перед измерением. Кроме того, контроль заполнения азотных ловушек контролировался по превышению фоновых значений проточной камеры БДГБ-02, это означает, что после фактического заполнения АЛ исследуемой средой и заполнением 10 дм^3 объема камеры, а также откликом электроники и окончанием прокачки газовой смеси через каскад АЛ проходило некоторое время. Следовательно потери могут появляться на этапе окончании пробоотбора на каскад.

Заключение

Проведено сравнение методов концентрирования проб газовоздушной смеси применительно к контролю выбросов ПРУ на предмет состава и количеств выбрасываемых ИРГ.

В пробах, полученных методом концентрирования под давлением, с наименьшей эффективностью идентифицируются ^{85m}Kr, ^{87}Kr, ^{88}Kr, ^{138}Xe, что обусловлено низким содержанием этих радионуклидов в выбрасываемой газовой смеси.

Активность ИРГ, измеряемая в пяти АЛ, в среднем в 3 – 9 раз, в зависимости от радионуклида, больше активности, измеряемой в сосуде Маринелли с закачанной в него газовоздушной смесью при давлении 0,7 МПа.

Рассчитанные для двух исследуемых методов, объемные активности ИРГ показывают, что результаты, полученные при расчете, показывают в среднем меньшую на 31% рассчитанную объемную активность при использовании

криогенного метода концентрирования. Это может быть объяснено потерями полезного объема прокачиваемой газовой смеси на этапе отсоединения азотных ловушек и их герметизации перед измерением и на этапе окончании пробоотбора на каскад.

Метод концентрирования под давлением при использовании рабочего давления газовоздушной смеси 0,7 МПа имеет в сравнении с криогенным методом меньший коэффициент концентрирования, однако коэффициент может быть увеличен путем повышения рабочего давления в сосуде. Кроме того, метод концентрирования под давлением лишен проблем с потерей полезного объема исследуемой газовой среды.

Библиографический список

1. Determination of radionuclide composition of the Russian NPPs atmospheric releases and dose assessment to population / M. E. Vasyanovich, A. A. Ekidin, A. Vasilyev [et al.] // Journal Environmental Radioactivity. – 2019. – Vol. 208/209. – P. 106006.
2. Special monitoring results for determination of radionuclide composition of Russian NPP atmospheric releases / M. E. Vasyanovich, A. Vasilyev, A. A. Ekidin [et al.] // Nuclear Engineering and Technology. – 2019. – Vol. 51, Iss. 4. – P. 1176–1179.
3. Екидин А. А. Идентификация основных дозообразующих радионуклидов в выбросах АЭС / А. А. Екидин, М. В. Жуковский, М. Е. Васянович // Атомная энергия. – 2016. – Т. 120, вып. 2. – С. 106–108.
4. Пыркова А. А. Поступление инертных радиоактивных газов в атмосферу при нормальной эксплуатации АЭС / А. А. Пыркова, А. А. Екидин, К. Л. Антонов // Физика. Технологии. Инновации : сб. материалов VI Междунар. молодеж. науч. конф., посвящ. 70-летию основания Физ.-техн. ин-та УрФУ. – Екатеринбург, 2019. – С. 279–287.
5. NPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Environmental Impact // IAEA Nuclear Energy Series NG-T-3.15. – Vienna, 2016. – Vol. 12/13. – P. 40–44.
6. Никитенко Е. И. Состав выбросов инертных радиоактивных газов, образующихся в процессе эксплуатации промышленной реакторной установки на ФГУП «ПО «Маяк» / Е. И. Никитенко, Е. Л. Мурашова // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2017. – Т. 2, вып. 18. – С. 90–97.
7. Пат. на изобретение 2714085 Рос. Федерация, МПК G01N 1/22. Способ измерения объемной активности инертных радиоактивных газов техногенного происхождения : № 2019111585 : заявл. 07.09.2018 : опубл. 11.02.2020 / Васянович М. Е., Екидин А. А. ; заявитель ООО «Агентство экол. безопасности «Альфа-Х91»«. – 6 с., ил.

УДК 620.186.4

Рыбалко С.В., Рыбалко В.Г., Новгородов Д.В. Сурков А.Ю., Губанов Я.В.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРИ РЕМОНТЕ УЧАСТКОВ ГАЗОПРОВОДОВ, СОДЕРЖАЩИХ ДЕФЕКТЫ КРН ГЛУБИНОЙ ДО 10% СТЕНКИ ТРУБЫ

Аннотация. Проблема коррозионного растрескивания под напряжением(КРН) остается актуальной на сегодняшний день, не смотря на более чем 40-летние исследования. Рассматриваются подходы к проблеме КРН различных научных организаций по отношению к дефектом глубиной до 10%. Описан механизм развития повреждаемости в зависимости от ph почвы. Предлагаются мероприятия с учетом кислотности почвы.

Ключевые слова: КРН, трещины, кислотность почвы, пескоструйная обработка, изоляционное покрытие.

Abstract. The SCC problem remains discussed until now, despite 40 years of research. The approaches to SCC of scientific organizations to defects up to 10% deep are considered. The mechanism of development depending on soil pH is described. Measures are proposed taking into account the acidity of the soil.

Keywords: SCC, cracks, soil acidity, sandblasting, insulation coating.

За последние 25 лет, коррозионное растрескивание под напряжением (КРН) стало настоящим бедствием для отечественных организаций, эксплуатирующих магистральные газопроводы большого диаметра. Ежегодно, в газотранспортных Обществах ПАО «Газпром» по причине КРН происходит несколько десятков аварий с возгоранием газа рисунок 1. Такие аварии рисунок 2 наносят существенный ущерб не только экологии, но и экономике России.

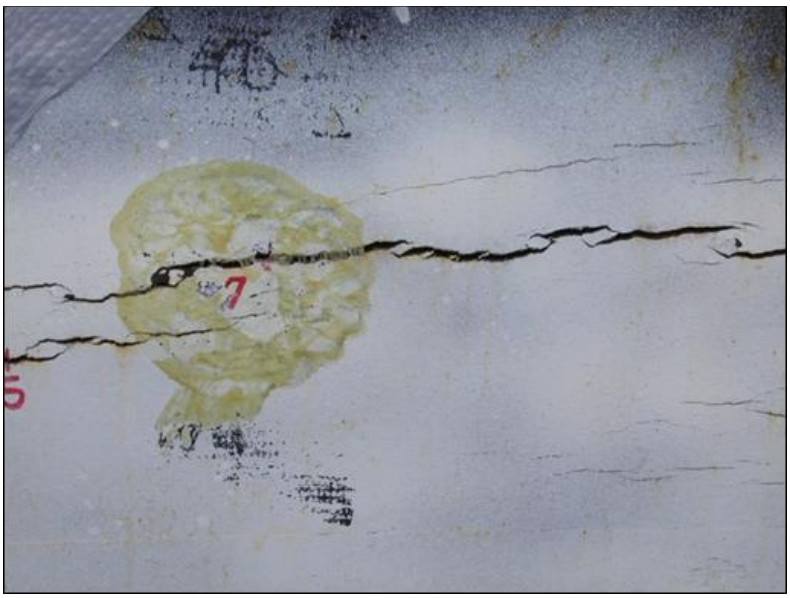


Рисунок 1 – Трещина КРН на наружной поверхности газопровода

Рисунок 2 – Аварийное разрушение газопровода с возгоранием из-за критического развития дефекта КРН.

Дефекты КРН являются наиболее опасными из всех видов коррозионной повреждаемости газопроводов, наиболее чаще приводящими к авариям на МГ [1]. Из статистики, полученной при анализе причин аварий в ООО «Газпром трансгаз Югорск» следует, что только за период с 1980 по 2007 гг. на объектах Предприятия произошло 87 аварий, 56 из которых по причине КРН. Поэтому, при техническом диагностировании участков ЛЧ МГ наибольшее внимание уделяется именно дефектам КРН. Однако, статистика показывает, что несмотря на значительные объемы ежегодно проводимых ремонтных работ (в том числе и по переизоляции участков ЛЧ МГ), количество таких дефектов только растет [2].

Приведенные факты дают основания полагать, что применяемые методы снижения дефектообразования не в полной мере эффективны, так как не учитываются все особенности зарождения и развития дефектов КРН. Одним из подтверждений сказанного могут служить результаты анализа данных, полученных в 2016 году сотрудниками Общества «Экспертиза» (г. Екатеринбург) в ходе расследования аварий. Согласно этим данным, примерно 25 % от общего количества аварий происходит в промежуток до 2-х лет после проведения капитального ремонта участков МГ.

Рассмотрим основные из существующих подходов к борьбе с КРН, в том числе описанные в действующей нормативной документации.

В 2013 году в ОАО «Газпром» был принят нормативный документ по оценке дефектов труб и соединительных деталей (далее – «Инструкция»), в котором предписывалось «при обнаружении стресс-коррозионных дефектов труб и СДТ их дополнительно обследовать в объеме 100% от площади поверхности в базовых или заводских условиях». При этом, «ремонт труб и СДТ со стресс-коррозионными дефектами, а также с трещинами любого происхождения, при капитальном ремонте в трассовых условиях не допускается. Трубы и СДТ с указанными дефектами подлежат ремонту только в заводских или базовых условиях».

При первом рассмотрении подход, предписывающий предприятиям, эксплуатирующим МГ, 100%-ю вырезку труб с трещиноподобными дефектами, решает задачу устранения выявленных дефектов КРН, но на практике положения Инструкции существенно осложняют процесс капитального ремонта участков МГ в целом, так как предполагают за собой существенные затраты на транспортировку труб, увеличение времени ремонтов, а также не предусматривают текущую загруженность трубных заводов.

В последствии, в нескольких дочерних Обществах ПАО «Газпром» была внедрена практика использования мини-заводов по ремонту и отбраковке труб, бывших в употреблении, но и это помогает лишь частично удовлетворить потребность с ремонтами участков МГ в соответствии с требованиями нормативной документации.

Из сказанного следует, что положения Инструкции не в полной мере адаптированы для использования на производстве, поскольку описанные в документе подходы к ремонту труб с трещиноподобными дефектами не могут быть в полной мере реализованы на практике.

С учетом того, что Инструкция является действующим нормативным документом, обязательным к применению в дочерних Обществах ПАО «Газпром» и, одновременно, с учетом очевидной необходимости пересмотра подходов к процессу ремонта труб с трещиноподобными дефектами, профильные научно-исследовательские институты, в том числе ООО «Газпром ВНИИГАЗ», выполняют опытные работы с целью оптимизировать затраты на проведение ремонтов.

Результаты исследований показывают, что подходы к ремонтам дефектов КРН могут быть разными. По мнению сотрудников ООО «Газпром ВНИИГАЗ», дефекты КРН, глубиной до 10 % от толщины стенки трубы не представляют опасности и могут быть приравнены к бездефектным трубам [3].

Такие выводы сделаны после того, как в рамках гидроциклических стендовых испытаний проведено нагружение участка трубы с дефектами КРН глубиной до 10% толщины стенки трубы 10000 циклами, что, по мнению авторов, эквивалентно 100 годам эксплуатации газопровода. При этом, дефекты КРН не выросли. Также авторы делают предположение, что поскольку дефекты КРН глубиной до 10%, по

результатам испытаний, не начали развиваться, то трубу с такими дефектами можно сопоставить с бездефектной трубой и оставить в эксплуатации. В продолжение исследований, авторы предлагают окончательно решить задачу с возможностью развития указанных дефектов путем их консервации, в том числе с применением защитных покрытий с ингибирующими композициями [4] и [5], исключив доступ к поверхности труб коррозионно-активной среды.

Такие соображения не новы. В разное время, различными научно-исследовательскими организациями выдвигались аналогичные утверждения. К примеру, в базовом документе «Коррозионное растрескивание под напряжением» [6] изложена методика, в основе которой данные о развитии дефектов КРН, собранные некоммерческой организацией «Canadian Energy Pipeline Association». В методике говорится, что дефекты КРН меньше 10 % толщины стенки трубы не опасны, поскольку практически не могут разрушиться под действием усталостных нагрузок в газопроводах. Их удаление путём вышлифовки не приводит к росту механической прочности трубы (наилучший вариант – пескоструйная обработка и восстановление целостности защитного покрытия с прекращением доступа электролита к основному металлу трубы). В таблице 1 приведено сравнение подходов к ремонту дефектов.

Таким образом, обе упомянутые организации предлагают, в основном, единый подход в отношении эксплуатирующих организаций к ремонту дефектов КРН глубиной до 10% от толщины стенки трубы – ограничение доступа к поверхности труб почвенного электролита.

Различие в том, что в исследованиях ООО «Газпром ВНИИГАЗ» не учтено, что дефекты КРН не имеют единой причины зарождения и развития. Предыдущими исследованиями доказано [7 – 10], что дефекты КРН по механизму зарождения и развития, подразделяются на 2 группы:

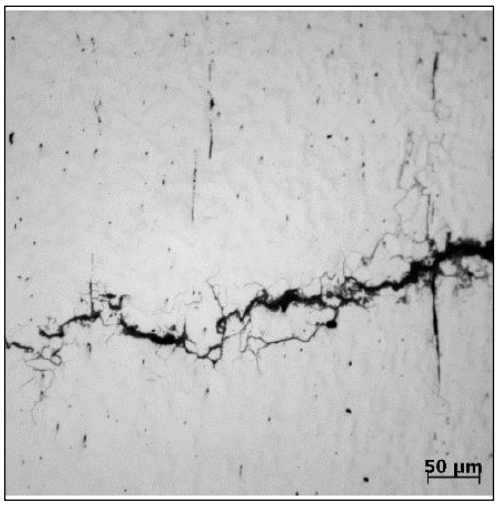
1. Образовавшиеся при высоком pH (> 9) грунта.
2. Образовавшиеся в почти нейтральных средах (pH 5÷7,5).

Таблица 1 – Подходы к ремонту КРН.

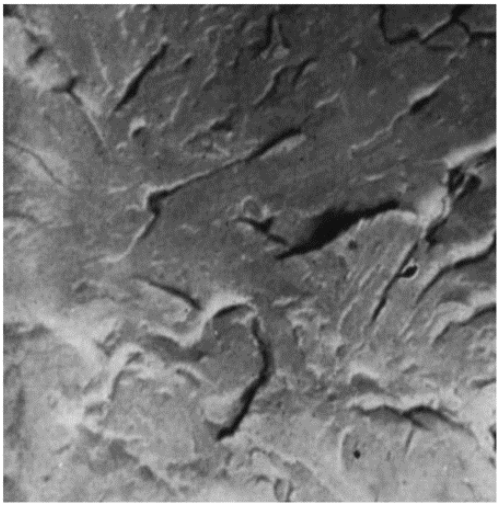
Название организации	Предлагаемый метод ремонта дефектов КРН глубиной до 10 % от толщины стенки трубы
ООО «Газпром ВНИИГАЗ»	Очистка поверхности труб металлическими щетками, нанесение защитного изоляционного покрытия, содержащего ингибиторы коррозии.
«Canadian Energy Pipeline Association»	Пескоструйная обработка поверхности труб, нанесение защитного изоляционного покрытия

В основном, случаи обнаружения дефектов КРН при высоком pH (> 9) зафиксировано при определении причин разрушения газопроводов в США. При этом, механизм разрушения металла труб – межкристаллитный.

В почти нейтральных средах (pH 5÷7,5) КРН образуется посредством транскристаллитного распространения трещин, то есть когда трещина распространяется по телу зерна, а не по границам зерен [11].



(а)



(б)

Рисунок 2 – Типы дефектов SCC по механизму зарождения и развития
а, – межкристаллитной; б – транскристаллитный

Такой вид образования КРН, в основном, зафиксирован при расследовании случаев разрушения газопроводов России и Канады [12]. Электролиты в таких грунтах содержат поверхностно-активные вещества, которые при абсорбции на поверхности металла трубы приводят к локальному понижению прочности стали (охрупчивание). Зарождаются такие дефекты не по коррозионным причинам (объединение коррозионных дефектов: язв питтиингов и пр.), концентраторами являются риски, закаты и другие механические повреждения поверхностного слоя металла труб.

Таким образом, определяя способ ремонта труб с дефектами КРН глубиной менее 10 % от толщины стенки трубы, образовавшихся по принципу транскристаллитного распространения, недостаточно ограничить доступ к поверхности трубы почвенного электролита.

Перед нанесением защитного изоляционного покрытия целесообразно выполнить мероприятия по определению pH грунтов, в которых пролегает дефектный участок и принять механизм образования трещин в соответствии с величиной pH:

pH > 9: механизм образования трещин межкристаллитный. В перечень технических мероприятий по ремонту дефектного участка включить пескоструйную обработку поверхности металла с последующим нанесением защитного изоляционного покрытия.

pH 5÷7,5: механизм образования трещин транскристаллитный. При ремонте дефектного участка ограничиться нанесением защитного изоляционного покрытия.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания по предмету «Диагностика» (№ АААА-А18-118020690196-3) при поддержке проекта Программы УрО РАН.

Библиографический список

1. Анализ стресс-коррозионного состояния технологических трубопроводов компрессорных станций и методика их технического диагностирования / М. Е. Сидорочев, Т. С. Есиев, И. В. Ряховских, Н. Е. Зорин // Газовая промышленность. – 2010. – № 9. – С. 48–52.
2. Макаров С. Н. Как предотвратить возникновение и развитие дефектов КРН / С. Н. Макаров, В. Г. Рыбалко, С. В. Рыбалко // ТехНадзор. – 2013. – № 3. – С. 48–50.
3. Исследование возможности длительной эксплуатации труб с незначительными стресс-коррозионными повреждениями / А. Б. Арабей, О. Н. Мелехин, И. В. Ряховский [и др.] // Научно-технический сборник Вести газовой науки. –2016. – № 3 (27). – С. 8–9.
4. Разработка ингибирующих композиций для предотвращения коррозионного растрескивания под напряжением магистральных газопроводов / А. И. Маршаков, И. В. Ряховский, В. Э. Игнатенко [и др.] // Научно-технический сборник Вести газовой науки. – 2016. – № 3 (27). – С. 48–63.
5. Совершенствование технологии ремонта протяженных участков магистральных газопроводов, подверженных коррозионному растрескиванию под напряжением / И. В. Ряховских, А. В. Мельникова, Д. А. Мишарин [и др.] // Научно-технический сборник Вести газовой науки. – 2016. – № 3 (27). – С. 79–86.
6. Stress Corrosion Cracking, Recommended Practices. – 2nd ed. – Calgary : CEPA, 2007. – 206 с.
7. Коррозионное растрескивание под напряжением труб магистральных газопроводов : атлас / А. Б. Арабей ; под ред. З. Кношински. – Москва : Наука, 2006. – 105 с.
8. Гурленов Е. М. Коррозионное растрескивание под напряжением трубных сталей : атлас / Е. М. Гурленов ; под ред. Н. В. Долгушина. – Москва : ВНИИГАЗ-Севернипигаз, 2004. – 117 с.
9. Турковская Е. П. Состояние проблеммы стресс-коррозии в странах СНГ и за рубежом / Е. П. Турковская ; под ред. Т. К. Сергеевой. – Москва : Газпром, 1997. – 99 с.
10. Parkins R. N. Transgranular stress corrosion cracking of high-pressure pipelines in

contact with solutions of near neutral pH / R. N. Parkins, Jr. W. K. Blanchard, B. S. Delanty / United States. – URL: https://doi.org/10.5006/1.3294348 (date of access: 05.05.2021).
11. Металловедение и термическая обработка металлов. – 2-е изд., доп. и перераб. / под ред. Ю. М. Лахтин. – Москва : Металлургия, 1976. – 320 с.
12. CEPA Recommended Practices for Managing Nearneutral pH Stress Corrosion Cracking. – 3 rd ed. – Calgari : CEPA, 2015. – 162 p.

УДК 616.12-073.97-71

Карякина О.Е., Карякин А.А., Оруджова О.Н.

ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ОЦЕНКИ СТРУКТУРНО – ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СЕРДЦА У ДЕТЕЙ ПЕРВОГО ГОДА ЖИЗНИ

Аннотация. В статье показана актуальность ультразвукового исследования в ранней диагностике врожденных пороков сердца у детей. Приведены результаты аналитического обзора сегмента программных средств по учету результатов ультразвуковых исследований, содержащие информацию об области применимости, функциональных возможностях. Представлены результаты разработки программного модуля оценки структурно-функциональных параметров сердца у детей первого года жизни на базе Архангельской областной детской клинической больницы им. П.Г. Выжлецова. Разработанный программный модуль включает два основных раздела, позволяющих вносить всю необходимую информацию о пациенте, контактные данные родителей, развернутый перечень из 30 структурных и функциональных параметров сердца, которые регистрируются у ребенка во время проведения эхокардиографии. Достоинствами разработанного программного модуля являются возможность соотнесения вводимых данных с нормативными величинами параметров сердца детей Европейского Севера России, разработанными коллективом авторов Архангельской областной детской клинической больницы, а также экспорта данных в медицинскую информационную систему учреждения здравоохранения.

Ключевые слова: программный модуль, параметры сердца, медицинская информационная система.

Abstract. The article shows the relevance of ultrasound in the early diagnosis of a congenital heart defects in children. The results of an analytical review of the segment of software for accounting for the results of ultrasound examinations, containing information on the area of applicability, functional capabilities, are presented. The results of the development of a software module for assessing the structural and functional parameters of the heart in children of the first year of life on the basis of the Arkhangelsk Regional Children's Clinical Hospital named after V.I. P.G. Vyzhletsova. The developed software module includes two main sections that allow you to enter all the necessary information about the patient, contact details of the parents, an expanded list of the 30 structural and functional parameters of the heart, which are recorded in a child during echocardiography. The advantages of the developed software module are the possibility of correlating the input data with a normative values of the heart parameters of children in the European North of Russia, developed by a team of authors of the Arkhangelsk Regional Children's Clinical Hospital, as well as exporting data to a medical information system of a healthcare institution.

Keywords: software module, heart parameters, medical information system.

Введение

Врожденные пороки сердца (ВПС) занимают одно из ведущих мест в структуре заболеваемости детей и подростков, представляя собой неправильно сформированные структуры сердца или сосудов во время развития эмбриона [1].

По данным Всемирной организации здравоохранения частота ВПС составляет 0,8–1,2% от числа всех новорожденных. Ежегодно только в России рождается более 20 тысяч детей с ВПС, которые находятся на втором месте по частоте встречаемости после врожденных пороков нервной системы и занимают первое место по смертности новорожденных и детей первого года жизни. Наиболее часто встречающимися пороками являются дефект межжелудочковой и межпредсердной перегородки, открытый артериальный проток, транспозиция магистральных сосудов, тетрада Фалло, коарктация аорты, стеноз легочной артерии. На указанные пороки приходится более двух третей всех ВПС [2].

Ранняя диагностика пороков является крайне важной, поскольку кровообращение плода отличается от кровообращения новорожденного ребенка, поскольку во время внутриутробного развития в сердечно-сосудистую систему не включены легкие. В раннем неонатальном периоде диагностика пороков сердца может быть затруднена ввиду неспецифичности симптомов. Многие, даже критические ВПС в период адаптации новорожденного могут протекать с минимальными проявлениями, либо маскироваться под симптомы других заболеваний [3].

В настоящее время сложно представить диагностику ВПС без применения ультразвукового исследования (УЗИ) не только на уровне крупных диагностических и лечебных центров, но и в учреждениях здравоохранения всех уровней. Широкое внедрение в медицинскую практику ультразвуковых методов исследования значительно повысило степень выявляемости данной патологии у детей [4]. Эффективный и качественный учет результатов УЗИ невозможен без применения специализированных программных средств.

Наиболее известной медицинской информационной системой, централизованно реализуемой в медицинских организациях РФ с 2004 г. компанией «Решение» (Россия), является автоматизированная система «Ариадна». В ее основе используется современная система управления базами данных «Oracle», обеспечивающая высокую надежность и скорость работы, позволяя хранить большие объемы информации в течение длительного времени. Встроенный в систему диагностический модуль «УЗИ» позволяет выполнять регистрацию и хранение исследований, врачебных заключений в виде формализованных протоколов или шаблонов, формирование итоговой отчетности [5].

Существуют также примеры частных некоммерческих технических решений, которые были разработаны на базе конкретных учреждений здравоохранения для профильных отделений ультразвуковой диагностики в соответствии с потребностями практикующих специалистов. Так, Н.Б. Куприенко с соавторами (2015) разработали программу для оценки показателей функционального состояния сердечно-сосудистой системы у детей с ожирением и артериальной гипертензией,

которая предназначена для быстрого и безошибочного ввода медицинских данных [6].

Программа авторов Горбуновой А.В., Санталовой Г.В. (2016) предназначена для статистического анализа структурных изменений сердца по показателям эхокардиографии с использованием статистических матриц 2x2, χ^2- критерия и ранговой корреляции. В программном модуле учитываются статистические отклонения z-критерия для показателей УЗИ сердца, что позволяет провести точный расчет данных и сформировать заключение о морфофункциональных особенностях миокарда в анализируемой группе детей [7].

Программный комплекс «Эхотека» (Россия), включенный в государственный реестр российского программного обеспечения, предназначен для формирования заключений по результатам эхокардиографии, УЗИ сосудов, внутренних органов, выполненных на разных аппаратах, и сохранения их в базе данных, которая может быть единой для большого количества удаленных рабочих мест. Кроме того, программа позволяет автоматически рассчитывать необходимые параметры, формировать и выводить на печать заключения, осуществлять быстрый поиск показателей. К недостаткам описанной системы можно отнести высокую стоимость, ограниченное количество шаблонов заключений, их перегруженность дополнительной информацией [8].

Компанией «Экспромед системс» разработано программное обеспечение «Доктор УЗИ», включающее в себя большое количество шаблонов для формирования протоколов УЗИ. В наборе опций имеется редактор, в котором пользователь может создать собственный протокол исследования, однако такой редактор не позволяет добавить в протокол новый список ключевых фраз, а обеспечивает лишь создание общей структуры [9].

Система автоматического протоколирования результатов УЗИ «Диассистент» представляет собой систему анализа ультразвуковых изображений, в результате которого производится обработка информации, необходимой для автоматического формирования протокола УЗИ. Данная разработка предназначена для поддержки принятия решения врача ультразвуковой диагностики, обработки и хранения результатов УЗИ, их документирования [10].

Авторами А.А. Митюшиным и В.А. Быковским (2014) создан программный модуль для протоколирования и анализа результатов УЗИ, который предназначен для записи, хранения, подробного анализа и вывода на печать результатов обследований пациентов. К дополнительным функциональным возможностям модуля относятся интерактивный статистический анализ сводных таблиц, возможность экспорта результатов в различные форматы документов, а также анализ эхографических изображений [11].

Имеются сведения о программе, предназначенной для учёта, оптимизации и анализа деятельности медицинских организаций, включая государственные учреждения и частные кабинеты УЗИ. К функциям программы относятся: ведение расписания, запись и напоминание о приеме (SMS, E-MAIL), ведение медицинских карт и протоколов УЗИ (в т.ч. формирование структуры протокола на усмотрение врача), прикрепление снимков [12].

Таким образом, по итогам проведённого обзора существующих программных средств по учету результатов УЗИ сердца у детей были отмечены следующие недостатки рассмотренных аналогов: высокая стоимость готовых программных продуктов; не полное соответствие функциональных возможностей программ запросам специалистов, необходимость интеграции программного модуля в информационную сеть учреждения здравоохранения. Учитывая вышеизложенное, разработка программного модуля оценки структурно-функциональных параметров сердца у детей первого года жизни по результатам эхокардиографии является актуальной.

Образцы и методика эксперимента

Целью настоящего исследования является разработка программного модуля оценки структурно-функциональных параметров сердца детей первого года, позволяющего вести эффективный учет результатов УЗИ.

Базой проведения настоящего исследования было выбрано отделение функциональной диагностики Архангельской детской областной клинической больницы им. П. Г. Выжлецова. Основные этапы разработки программного модуля включали в себя: разработку структуры основных и справочных таблиц, установление взаимосвязей между ними, разработку интерфейса, а на заключительных этапах реализацию основных функций и обеспечение работы с файлами. Формирование структуры таблиц было осуществлено в системе управления базами данных «Microsoft Office Access», которая предназначена для хранения и поиска данных. После создания таблиц для каждого раздела в базе данных приложению «Microsoft Office Access» были предоставлены средства, с помощью которых объединены сведения из различных таблиц. Настройку взаимосвязей между сформированными таблицами осуществляли путем создания общих полей в связанных таблицах. Следующий этап заключался в разработке графического интерфейса программного модуля. В качестве среды разработки использовали «Microsoft Visual Studio». Для реализации программного модуля выбор был сделан в пользу языка C#, который поддерживает как объектно-ориентированный, так и функциональный стили программирования.

Результаты и обсуждение

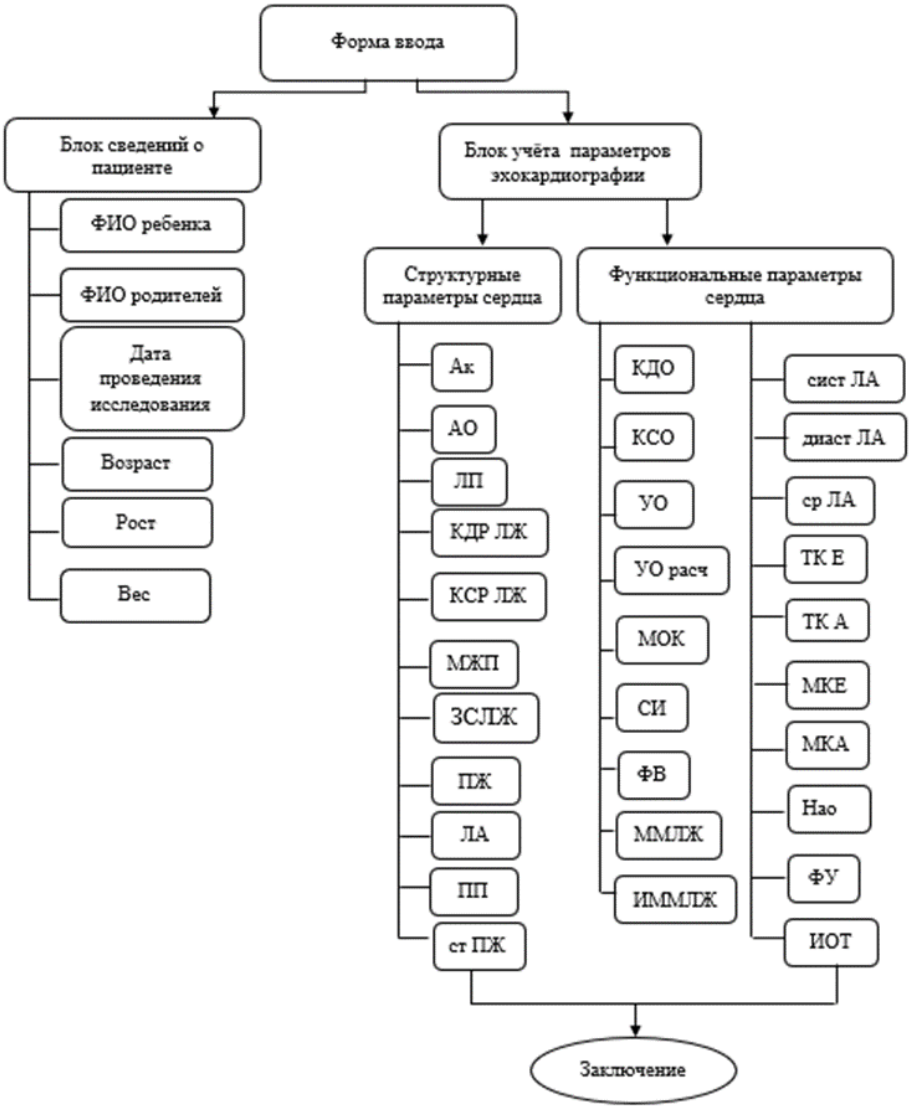
Разработанный программный модуль состоит из двух основных блоков. В «Блок сведений о пациенте» регистратор вносит всю необходимую информацию о ребенке (возраст, рост, вес), контактные данные родителей, дату проведения исследования. «Блок учёта параметров эхокардиографии» позволяет вносить развернутый перечень из 30 структурных и функциональных параметров сердца, которые регистрируются у ребенка во время проведения УЗИ. В завершении исследования формируется «Заключение», содержащее полученные результаты, на основании которых врач формирует предварительный диагноз. Структурная схема разработанного программного модуля представлена на рисунке 1.

Главное диалоговое окно модуля содержит функции формирования нового протокола, заполнение основной информации о пациенте и просмотр ранее сохраненных протоколов (рисунок 2). Диалоговое окно регистрации в протоколе структурных и функциональных параметров сердца пациента содержит функции ввода и сохранения данных. Включены такие структурные параметры сердца, как величины диаметра правого желудочка, правого предсердия, легочной артерии, аорты, раскрытия аортального клапана, левого предсердия, а также конечно-систолический и конечно-диастолический размеры левого желудочка, толщина межжелудочковой перегородки и задней стенки левого желудочка в фазы систолы и диастолы.

Следует отметить, что определение параметров сердца играет важную роль в диагностике и прогнозе заболеваний сердца, а также в выборе и оценке эффективности терапии. Наиболее критический возрастной период у детей – период новорожденности (первые 28 дней), он характеризуется активной перестройкой кровообращения ребенка. Представлены функциональные показатели: значения скорости в атриовентрикулярных клапанах, аорте и легочной артерии, конечно-систолический и конечно-диастолический объемы, ударный объем, минутный объем кровообращения, сердечный индекс, фракция выброса, частота сердечных сокращений за 1 минуту и ряд других.

Диалоговое окно регистрации структурных и функциональных параметров сердца ребенка содержит функции ввода показателей и сохранение данных. Представленная форма имеет те же элементы управления, что и главная (рисунок 3).

Отображение ранее сохраненных сведений о проведенных исследованиях реализовано в диалоговом окне «Журнал», которое было создано с использованием элемента управления «DataGridView».



Ак – аортальный клапан; АО- ширина аорты; ЛП- левое предсердие; КДР ЛЖ-конечно-диастолический размер левого желудочка; КСР ЛЖ- конечно-систолический размер левого желудочка; МЖП- толщина межжелудочковой перегородки; ЗСЛЖ-задняя стенка левого желудочка; ПЖ-правый желудочек; ЛА-легочная артерия; ПП-правое предсердие; ст ПЖ- стенка правого желудочка; КДО – конечный диастолический объем; КСО – конечный систолический объем; УО – ударный объем; МОК – минутный объем кровообращения; СИ – сердечный индекс; ФВ – фракция выброса; ММЛЖ – масса миокарда левого желудочка; ИММЛЖ – индекс массы миокарда левого желудочка; систЛА – систолическое давление легочной артерии; дистЛА – диастолическое давление легочной артерии; ср ЛА – среднее давление легочной артерии; ТК Е – скорость кровотока через трикуспидальный клапан (Е-пик); ТК А – скорость кровотока через трикуспидальный клапан (А – пик); МКЕ – скорость кровотока через митральный клапан (Е-пик); МКА – скорость кровотока через митральный клапан (А-пик); Нао – скорость кровообращения в нисходящей аорте; ФУ – фракция укорочения; ИОТ – индекс относительной толщины левого желудочка.

Рисунок 1 – Структурная схема программного модуля оценки структурно-функциональных параметров сердца у детей

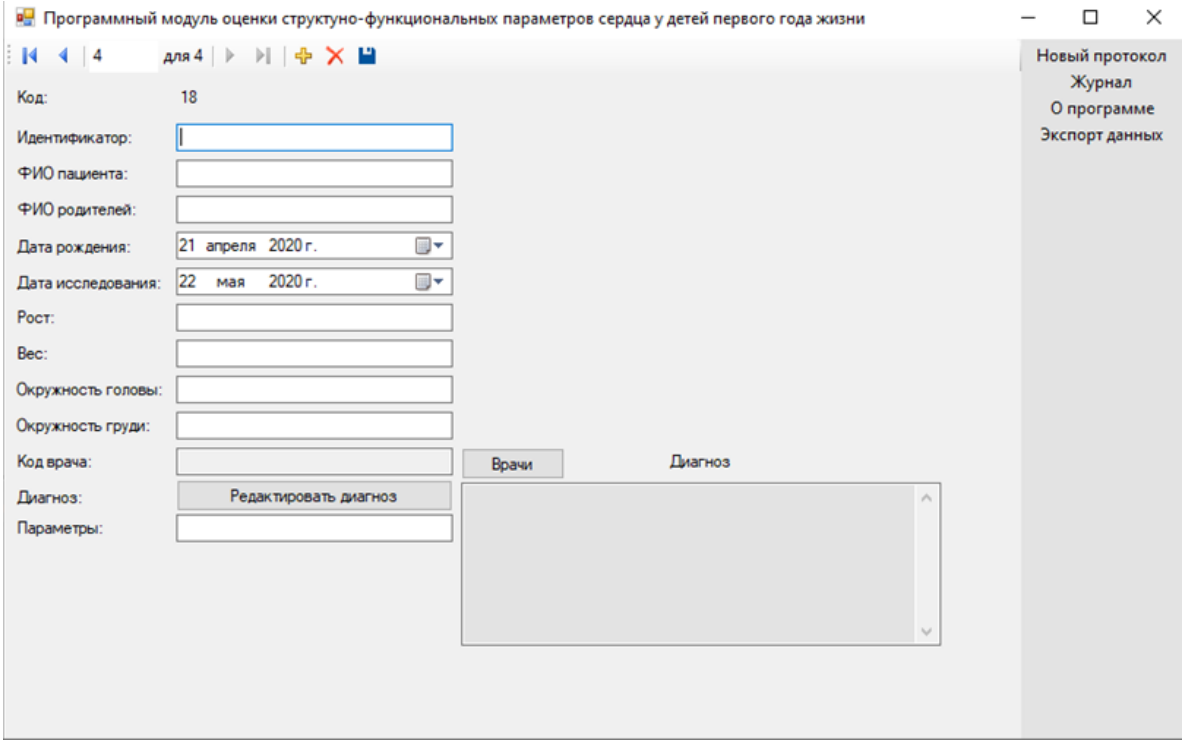


Рисунок 2 – Главное диалоговое окно программного модуля

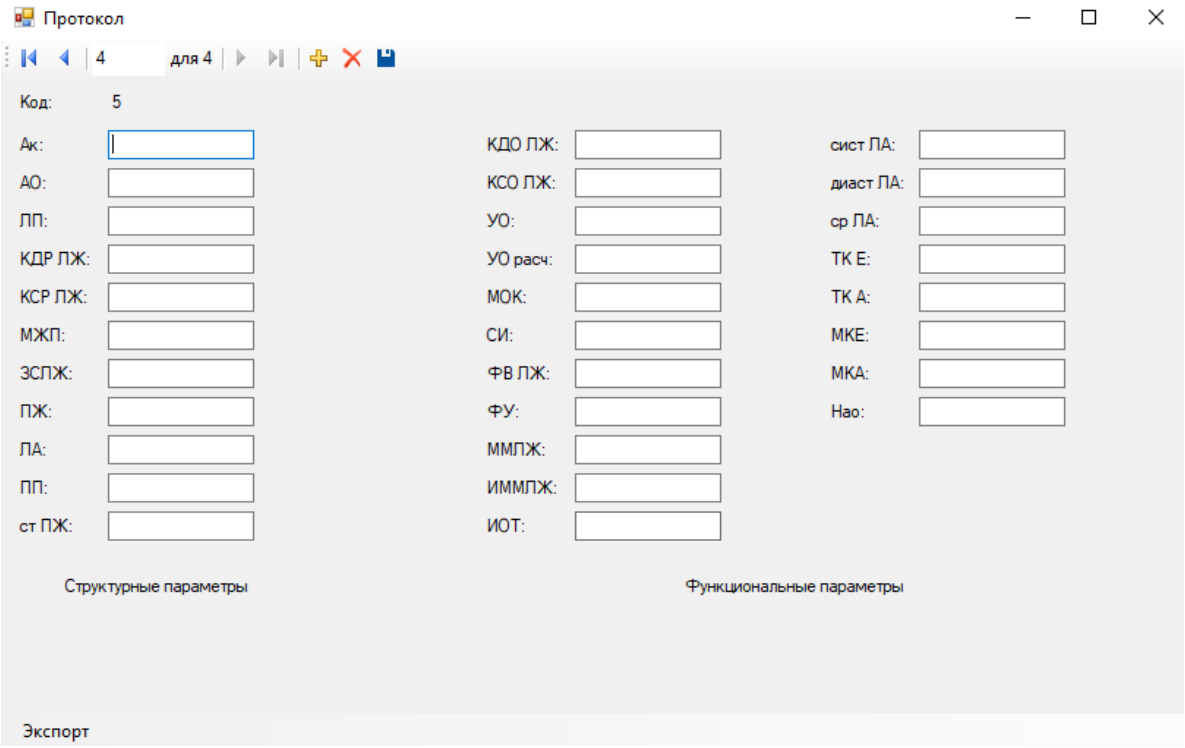


Рисунок 3 – Диалоговое окно регистрации структурных и функциональных параметров сердца детей первого года жизни

В программном модуле дополнительно доступна опция экспорта данных в печатную форму с помощью среды «LibreOffice», которая является кроссплатформенной и свободно распространяемой на условиях лицензии MPL 2.0.

Для экспорта протокола исследования в медицинскую информационную систему учреждения здравоохранения использован механизм его преобразования в XML формат. Протокол формируется в двух экземплярах, один в формате XML и вносится в медицинскую информационную систему учреждения здравоохранения, второй – выводится на печать и выдается законному представителю пациента.

Важнейшим достоинством разработанного программного модуля является возможность соотнесения вводимых данных с нормативными величинами параметров сердца детей Европейского Севера России, разработанными коллективом авторов [13] Архангельской областной детской клинической больницы.

На этапе апробации программного модуля в него были внесены 70 записей о результатах проведенных в отделении функциональной диагностики УЗИ сердца детям первого года жизни. Среди потенциальных пользователей программного модуля структурно-функциональных параметров сердца у детей первого года жизни было проведено анкетирование на предмет удовлетворенности функциональными возможностями программы.

Таким образом, своевременно проведенная эхокардиография, правильное трактование и эффективный учет полученных результатов помогают поставить правильный диагноз, а, следовательно, назначить адекватное лечение. Кроме того, сохраненный в программном модуле архив записей результатов УЗИ позволит формировать новые знания об изменениях сердца в процессе онтогенеза.

Заключение

Разработанный программный модуль представляет собой в первую очередь простую в использовании систему быстрого заполнения и хранения протоколов ультразвуковых исследований в электронном виде, быстрый поиск и всесторонний анализ данных. Кроме того, предусмотрено создание любого количества собственных вариантов протоколов исследований.

Таким образом, разработанный программный модуль оценки структурно-функциональных параметров сердца у детей первого года жизни позволит:

- сократить время проведения исследования путем быстрого ввода и формирования протокола исследования;
- осуществлять экспорт и печать протоколов в пакет программ «LibreOfficeBase»;
- вести архив результатов эхокардиографии с реализацией функций поиска и печати предыдущих протоколов;
- формировать готовые интерактивные протоколы исследования;
- воспользоваться полным перечнем эхокардиографических параметров, регистрируемых у детей первого года жизни.

Библиографический список

1. Диагностика сердечных аномалий у плода. – URL: https://bolezn.info/analizyi-obsledovaniya/prichiny-vozniknoveniya-porok-serdtsa-u-ploda-vo-vremya-beremennosti-lechenie-i-prognoz-porok-serdtsa-u-ploda-v-utrobe-materi.html (дата обращения: 08.01.2020).
2. Глазун Л. О. Ультразвуковая диагностика врожденных пороков сердца : учеб. пособие для системы послевуз. и доп. проф. образования врачей / Л. О. Глазун. – Хабаровск : ИПКСЗ, 2013. – 186 с.
3. Пренатальная диагностика пороков сердца. – URL: https://medaboutme.ru/prenatalnaya_diagnostika_porokov_serdtsa (дата обращения: 12.01.2020).
4. Белозеров Ю. М. Распространенность врожденных пороков сердца у детей на современном этапе / Ю. М. Белозеров ; Науч.-исслед. клин. ин-т педиатрии. – Москва : НИКИП, 2014. – 11 с.
5. Медицинская информационная система «Ариадна». – URL: https://reshenie-soft.ru/about-system (дата обращения: 13.01.2020).
6. Пат. № 2015618616 Рос. Федерация. Программа ввода данных показателей функционального состояния сердечно-сосудистой системы и почек у детей с ожирением и артериальной гипертензией : № 2014661565 : заяв. 17.11.2014 : опубл. 20.09.2015 / Куприенко Н. Б. – 2 с., ил.
7. Пат. 2016613147 Рос. Федерация. Программа статистического анализа показателей ЭХОКГ у детей : № 2016610470 :заяв. 22.01.2016 : опубл. 20.04.2016 / Горбунова А. В., Санталова Г. В. – 3 с., ил.
8. АРМ врача УЗИ. Эхотека. – URL: http://echo1.ru (дата обращения: 15.05.2020).
9. Автоматизированное рабочее место врача УЗИ. – URL: http://uzi.center/arm_usi/ (дата обращения: 15.05.2020).
10. Пат. 2010106248 Рос. Федерация. Способ и система систематизации, хранения, анализа и предоставления доступа к собранным и проанализированным данным, касающимся исследований биологических объектов и окружающей среды : № 2010106248 ; заяв. 23.07.2008 : опубл. 27.08.2011 / Гринберг М. М., Годсолл Дж. А. – 4 с., ил.
11. Пат. 2014616951 Рос. Федерация. Протоколирование и анализ результатов клинических ультразвуковых исследований : № 2014614802 : заяв. 22.05.2014 : опубл. 20.08.2014 / Митюшин А. А. – 2 с.
12. Пат. 2018616914 Рос. Федерация. Программа автоматизации деятельности медицинской организации «Реестры ЛПУ» : № 2018614831 : заяв. 19.04.2018 : опубл. 09.06.2018 / Лимонова О. М. –2 с.
13. Пат. 2014620221 Рос. Федерация. База данных «ИМБИ-ЭХОКГ» : № 2013621694 : заяв. 13.12.2013 : опубл. 20.02.2014 / Крайнова И. Н., Грибанов А. В., Соколовский А. В. – 2 с.

УДК 536.46

Князева А. Г., Овчинников Е. Н

ИНИЦИИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ В ПОЛУПРОЗРАЧНОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ МАТЕРИАЛЕ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ СОПРЯЖЕННОГО ТЕПЛООБМЕНА

Аннотация. Численно исследована задача об инициировании радиационным потоком реакции в слое, размещенном между двумя инертными материалами. Получены для различных моментов времени распределения температур в трехслойном образце и концентрации продукта реакции в промежуточном слое. Изучено влияние на распределения температуры и степени превращения оптических свойств реагента. Проанализированы зависимости от плотности теплового потока полупериоды химической реакции при варьировании параметров модели. Показано, что время полупревращения определяется как теплофизическими, так и оптическими свойствами.

Ключевые слова: химическая реакция, сопряженный теплообмен, лазерное излучение.

Abstract. The problem of a reaction initiation by radiant flux in a layer placed between two inert materials is investigated numerically. The temperature distributions in the three-layer sample and the concentration of reaction product in the intermediate layer are obtained at different moments of the time. The influence of the ratio between the thermophysical properties of the materials on the temperature distributions and the degree of transformation has been studied. The dependences on the heat flux density of the chemical reaction half-life with varying model parameters have been analyzed. It is shown that the half-transformation time is determined by both thermophysical and optical properties.

Keywords: Chemical reaction, conjugate heat exchange, laser radiation.

Введение

Сопряженные задачи теплопроводности являются одними из важнейших задач математической физики, так как представляют большой практический интерес. С их применением можно встретиться при решении проблем в области пожаровзрывобезоопасности [1], в строительстве при расчете теплоотдачи ограждающих строительных конструкций, обусловленной неоднородностью материала [2], радиоэлектронике при расчете оптимальных тепловых режимов для отвода тепла от оборудования, при описании теплообмена в половолоконных мембранах, которые используются в теплообменниках [3], а также во многих других областях.

При условии протекания в одном из материалов химических реакций интерес представляет изучение их макроскопических особенностей в условиях воздействия лазерного излучения. В настоящее время среди других приложений разработка новых практических способов инициирования химической реакций в энергетических материалах ставит перед исследователями серьезные задачи.

В качестве источника энергии для управления химическими реакциями лазерное излучение применяется уже многие десятилетия. С одной стороны, это обусловлено практическими нуждами в связи с разработкой светодетонаторов, обладающих высокой помехозащищенностью. С другой стороны, подобные исследования имеют непосредственное отношение к проблемам защиты от внешних воздействий энергетических материалов и их смесей в условиях хранения, транспортировки и переработки [4]. Большая роль в этой области отводится математическому моделированию. Например, в [5] изучается влияние оптических свойств взрывчатых веществ, зависящих от наличия поглощающих включений, на характер инициирования реакций в рамках приближения диффузно-рассеивающей среды. В [6] представлены теоретические и экспериментальные результаты исследований начальных стадий реакции взрывного разложения азидов тяжелых металлов. При этом установлена важная роль сопутствующего процесса локального сжатия кристаллической решетки. Авторы [7] численно изучали процесс зажигания с учетом фазовых переходов. Микроочаговая модель зажигания лазерным импульсом анализируется в [8].

Несмотря на большое число публикаций, остается нерешенным ряд вопросов, связанных с физическими механизмами инициирования реакций при воздействии высокоинтенсивных лазерных импульсов.

В настоящей работе будем анализировать ситуацию, в которой энергетический материал (ЭМ) находится между стеклянной и металлической пластинами. Исследуем процесс нагрева такого трехслойного образца лазерным излучением. В зависимости от оптических свойств границ раздела и ЭМ ситуация может быть разной, что приведет к различным закономерностям в протекании химической реакции. В отличие от [4, 9], учтем в модели явно влияние теплофизических свойств материалов, между которыми расположено реакционноспособное вещество, а также оптические свойства границ раздела.

Постановка задачи

Рассмотрим трехслойный образец, на который слева падает радиационный поток. Каждый из слоев обладает заданным набором свойств, отличных от свойств других слоев. Полагаем для определенности, что первый слой является абсолютно прозрачным, второй слой полупрозрачным, третий – слой абсолютно непрозрачным. Во втором слое содержится материал, в котором при определенных условиях может протекать химическая реакция. Если при этом выделяется большое количество тепла, то говорим об энергетическом материале. Подобная модель описана в [4], однако детальные исследования модели не проводились.

Будем полагать, что суммарная толщина всех слоев много меньше размера трёхслойного образца в направлениях, перпендикулярных оси oZ, а энергия во

внешнем источнике тепла распределена однородно в плоскости XY. В этом случае мы можем ограничиться одномерной задачей теплопроводности. Начало координат и ось oZ направим так, чтобы первый слой находился в области от $z=-L_1$ до $z=0$; второй в области от $z=0$ до $z=L_2$; третий – от $z=L_2$ до $z=L_2+L_3$.

Математическая постановка задачи включает уравнения теплопроводности и граничные условия, имеет следующий вид:

$$c_k\rho_k\frac{\partial T_k}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_k\frac{\partial T_k}{\partial z}\right)+W_k,$$

$$k=1 \text{ для } -L_1<z<0;\ k=2 \text{ для } 0\le z<L_2 \text{ и } k=3 \text{ для } L_2\le z<L_2+L_3;$$

$$z=-L_1:\ \lambda_1\frac{\partial T_1}{\partial z}=0;$$

$$z=0:\ \lambda_1\frac{\partial T_1}{\partial z}=\lambda_2\frac{\partial T_2}{\partial z};\ T_1=T_2;$$

$$z=L_2:\ \lambda_2\frac{\partial T_2}{\partial z}=\lambda_3\frac{\partial T_3}{\partial z};\ T_2=T_3;$$

$$z=L_2+L_3:\ \lambda_2\frac{\partial T_2}{\partial z}=0;$$

$$t=0;\ T_k=T_0, k=1,2,3,$$

где T_k – температура k-ого слоя, c_k – теплоемкость k-ого слоя, ρ_k – плотность k-ого слоя, λ_k – коэффициент теплопроводности k-ого слоя, W_1, W_2 – объемные источники тепла. При этом, $W_1=0$ так как этот слой не поглощает энергию излучения. Функция W_2 будет являться суммой двух слагаемых

$$W_2=QW(T_2,\eta)+w_2.$$

Первое слагаемое учитывает выделения тепла от химической реакции, второе – поглощение излучения от лазера в объеме. Для скорости химического тепловыделения имеем

$$W(T_2,\eta)=k_0(1-\eta)\exp\left(-\frac{E}{RT}\right),$$

где k_0 – предэкспонент; E – энергия активации суммарной химической реакции; R – универсальная газовая постоянная, η – степень превращения, которая находится из кинетической подзадачи

$$\frac{d\eta}{dt}=W(T_2,\eta),\ \eta(0,z)=0.$$

Второе слагаемое в W_2, а также W_3 можно получить с помощью законов геометрической оптики, используя закон Ламберта-Бугера [9]. Считаем, что слева на трехслойный образец падает лазерное излучение. Тогда к поверхности $z=-L_1$, будет

подходить поток энергии q_0. Так как показатель поглощения первого слоя равен нулю, то поток энергии, который подходит к границе второго слоя также будет равен q_0. Энергия, подведенная к этой границе, будет состоять из трех частей: отраженной, поглощенной, пропущенной второй пластиной

$$Q_2 = R_2 + A_2 + \Pi_2,$$

где $R_2 = q_0 f_2$ – часть отраженной энергии; $A_2 = q_0(1 - f_2)\exp(-\sigma_2 z)$ – часть поглощенной энергии; $\Pi_2 = q_0(1 - f_2)\exp(-\sigma_2 L_2)$ – часть энергии, которая подходит к границе третьего слоя.

Отраженная от границы второго слоя энергия R_2 вновь проходит через первый слой и покидает его беспрепятственно, так как он абсолютно прозрачный, а значит, что коэффициент отражения равен нулю.

Величина Π_2 представляет собой энергию, которая подходит к поверхности третьего слоя. Эта энергия также будет состоять из трех частей: отраженной, поглощенной, пропущенной третьей пластиной

$$Q_3 = R_3 + A_3 + \Pi_3,$$

где

$$R_3 = f_3 \Pi_2 =$$
$$= f_3 q_0 (1 - f_2)\exp(-\sigma_2 L_2);$$
$$A_3 = (1 - f_3)\Pi_2 \exp(-\sigma_3 (z - L_2)) =$$
$$= (1 - f_3)\exp(-\sigma_3 (z - L_2)) q_0 (1 - f_2)\exp(-\sigma_2 L_2);$$
$$\Pi_3 = (1 - f_3)\Pi_2 \exp(-\sigma_3 L_3) =$$
$$= (1 - f_3)\exp(-\sigma_3 L_3) q_0 (1 - f_2)\exp(-\sigma_2 L_2).$$

Отраженный от границы третьего слоя поток R_3 распространяется обратно через первую и вторую среду. В результате во второй области источник тепла будет состоять из двух частей: поглощенной энергии при прямом прохождении луча, поглощенной энергии от той, которая отражается от границы:

$$Q_2^{'} = R_3 = A_2^{'} + \Pi_2^{'},$$

где

$$A_2^{'} = f_3 \Pi_2 \exp(-\sigma_2 (L_2 - z)) =$$
$$= f_3 \exp(-\sigma_2 (L_2 - z)) q_0 (1 - f_2)\exp(-\sigma_2 L_2);$$
$$\Pi_2^{'} = f_3 \Pi_2 \exp(-\sigma_2 L_2) =$$
$$= f_3 \exp(-2\sigma_2 L_2) q_0 (1 - f_2).$$

Если считать, что коэффициент отражения от внутренней поверхности третьего слоя равен нулю, тогда пропущенная часть энергия будет беспрепятственно

покидать третью область. Как сказано выше, третий слой далее будет считаться непрозрачным.

В результате получим следующие выражения для объемных источников энергии:

$$W_1 = 0;$$

$$w = \sigma_2 q_0 (1 - f_2)\exp(-\sigma_2 z) + \sigma_2 f_3 \exp(-\sigma_2 (L_2 - z)) q_0 (1 - f_2)\exp(-\sigma_2 L_2) =$$

$$= \sigma_2 q_0 (1 - f_2)\exp(-\sigma_2 z)[1 + f_3 \exp(-2\sigma_2 (L_2 - z))];$$

$$W_3 = \sigma_3 q_0 (1 - f_3)(1 - f_2)\exp(-\sigma_3 (z - L_2))\exp(-\sigma_2 L_2),$$

где q_0 – величина теплового потока, f_1, f_2, f_3 – коэффициенты отражения от границ слева первого, второго и третьего слоя, σ_1, σ_2, σ_3 – коэффициенты поглощения первого, второго и третьего слоя соответственно.

Алгоритм численного решения задачи

Решать поставленную задачу будем с помощью метода конечных разностей. Опишем алгоритм для нахождения распределения температуры в трехслойном образце. Используем неявную разностную схему:

$$c_k \rho_k \frac{T_i - \check{T}_i}{\Delta t} = \lambda_k \frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{h_k^2} + W_{k,i}, \qquad (1)$$

где h_k – пространственный шаг по слою k.

Представим разностные уравнения теплопроводности в виде

$$a_i T_{i-1} - c_i T_i + b_i T_{i+1} = -f_i \qquad (2)$$

где

$$a_i = \frac{\Delta t \lambda_k}{h_k^2 c_k \rho_k},\ b_i = \frac{\Delta t \lambda_k}{h_k^2 c_k \rho_k},\ c_i = 1 + 2\frac{\Delta t \lambda_k}{h_k^2 c_k \rho_k},\ f_i = \check{T}_i + \frac{W_{k,i}}{c_k \rho_k}\Delta t$$

Полученную систему разностных уравнений будем решать методом прогонки, для чего примем

$$T_{i-1} = \alpha_i T_i + \beta_i \qquad (3)$$

Подставляя (3) в уравнение (2), найдем рекуррентные соотношения

$$\alpha_{i+1} = -\frac{B_i}{A_i \alpha_i - C_i},\ \beta_{i+1} = -\frac{F_i - A_i \beta_i}{A_i \alpha_i - C_i} \qquad (4)$$

Используем разложение температуры в точке $i = 1$ относительно точки $i = 0$ в ряд Тейлора с точностью до слагаемого второго порядка малости по пространственному шагу и уравнение теплопроводности для слоя 1, чтобы найти вторую производную, а также граничное условие в этой точке, получим выражения для первых прогоночных коэффициентов

$$\alpha_1 = \frac{\dfrac{2\Delta t\lambda_1}{h_1^2 c_1\rho_1}}{1+\dfrac{2\Delta t\lambda_1}{h_1^2 c_1\rho_1}},\ \beta_1 = \frac{\check{T}_0 + \dfrac{W_k}{c_k\rho_k}\Delta t}{1+\dfrac{2\Delta t\lambda_1}{h_1^2 c_1\rho_1}} \tag{5}$$

На внутренних границах строим разложения температуры в ряды Тейлора в соседних точках относительно граничной; затем поступаем аналогично в точке $i = 0$. В результате найдем:

$$a_{n_1} = \frac{2\Delta t\lambda_1}{h_1^2 c_1\rho_1},\ b_{n_1} = \frac{2\Delta t\lambda_2}{h_2^2 c_2\rho_2}\kappa_1,\ c_{n_1} = 1 + \frac{2\Delta t\lambda_1}{h_1^2 c_1\rho_1} + \kappa_1 + \frac{2\Delta t\lambda_2}{h_2^2 c_2\rho_2}\kappa_1;$$

$$f_{n_1} = \check{T}_{n_1}(1+\kappa_1) + \frac{W_1\Delta t}{c_1\rho_1} + \frac{W_2\Delta t}{c_2\rho_2}\kappa_1 \tag{6}$$

для точки $x = 0$ и

$$a_{n_2} = \frac{2\Delta t\lambda_2}{h_2^2 c_2\rho_2},\ b_{n_2} = \frac{2\Delta t\lambda_3}{h_3^2 c_3\rho_3}\kappa_2,\ c_{n_2} = 1 + \frac{2\Delta t\lambda_2}{h_2^2 c_2\rho_2} + \kappa_2 + \frac{2\Delta t\lambda_3}{h_3^2 c_3\rho_3}\kappa_2;$$

$$f_{n_2} = \check{T}_{n_2}(1+\kappa_2) + \frac{W_2\Delta t}{c_2\rho_2} + \frac{W_3\Delta t}{c_3\rho_3}\kappa_2 \tag{7}$$

для точки $x = h_2$, где $\kappa_1 = \dfrac{h_2 c_2\rho_2}{h_1 c_1\rho_1}$, $\kappa_2 = \dfrac{h_3 c_3\rho_3}{h_2 c_2\rho_2}$.

Затем, используя условия на правой границе в *N*-ой точке, записанное в разностном виде, и уравнение (2), записанное для точки *N*, найдем уравнение для температуры в этой точке

$$T_n = \frac{\xi_N\beta_N + \eta_N}{1-\xi_N\alpha_N}, \tag{8}$$

где

$$\xi_N = \frac{\dfrac{2\lambda_3\Delta t}{h_3^2 c_3\rho_3}}{\dfrac{2\lambda_3\Delta t}{h_3^2 c_3\rho_3}+1},\ \eta_N = \frac{\check{T}_N + \dfrac{W_3}{c_3\rho_3}\Delta t}{\dfrac{2\lambda_3\Delta t}{h_3^2 c_3\rho_3}+1}. \tag{9}$$

Для нахождения химического источника тепла и степени превращения, решаем кинетическое уравнение полунеявным методом:

$$\eta_i = \frac{\check{\eta}_i + \Delta t k_0 \exp\left(-\dfrac{E}{RT_i}\right)}{1+\Delta t k_0 \exp\left(-\dfrac{E}{RT_i}\right)} \tag{10}$$

Для каждого слоя по времени последовательность решения такова:

1. Находим граничные условия по формулам (5), (9).

2. Затем вычисляем все другие прогоночные коэффициенты по формулам (4) с учетом различных формул для коэффициентов в слоях и на границах между ними.

3. Находим температуру в точке N по формуле (8).

4. Далее идет обратная прогонка по формуле (3).

5. Следующий шаг – определение степени превращения по (10) и вычисление химического источника тепла.

На следующем шаге по времени процедура повторяется.

Для исследования особенностей протекания химической реакции необходимо находить такую величину, как интегральная степень превращения. Вычислить ее можно с помощью следующей формулы

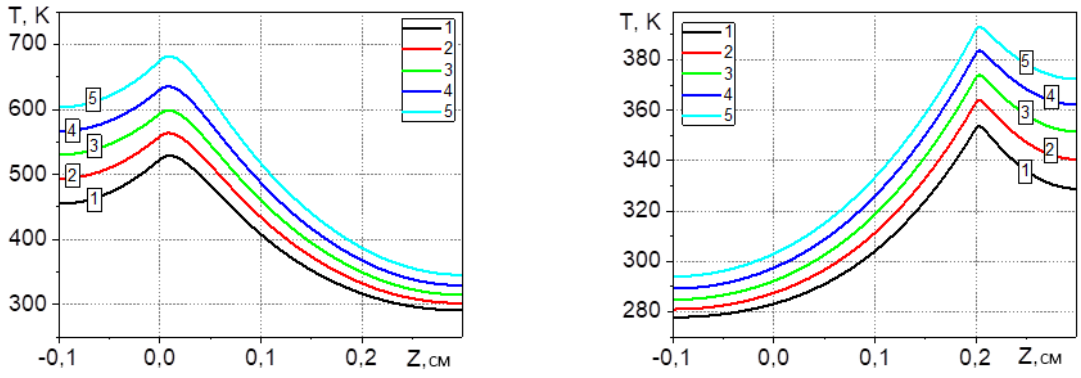
$$Y(t) = \frac{1}{L_2}\int_0^{L_2} \eta(x,t)dh$$

При численном решении можно использовать любой метод вычисления интеграла от таблично заданной функции (например, метод прямоугольников).

Частные варианты модели

В расчетах принято: $\lambda_1 = 0.05\ \frac{Дж}{см \cdot с \cdot K}$, $\rho_1 = 2.5\ \frac{г}{см^3}$, $c_1 = 0.7\ \frac{Дж}{г \cdot K}$ (стекло); $\lambda_2 = 0.05\ \frac{Дж}{см \cdot с \cdot K}$, $\rho_2 = 1.6\ \frac{г}{см^3}$, $c_2 = 1.2\ \frac{Дж}{г \cdot K}$ (ЭМ); $\lambda_3 = 0.05\ \frac{Дж}{см \cdot с \cdot K}$, $\rho_3 = 4.54\ \frac{г}{см^3}$, $c_3 = 0.53\ \frac{Дж}{г \cdot K}$ (металл); $L_1 = 0.1\ см$, $L_2 = 0.2\ см$, $L_3 = 0.1\ см$.

Для данной постановки задачи интерес представляют два частных варианта: первый – ЭМ материал является непрозрачным (Рисунок 1, а), второй – ЭМ является абсолютно прозрачным (Рисунок 1, б).



а б

Рисунок 1 – Распределения температур в различные моменты времени: 1-0.5с, 2-0.6с, 3-0.7с, 4-0.8с, 5-0.9с; q_0= 300 Дж/(см^{2}с).

Химической реакции нет

Если ЭМ материал является непрозрачным, то источник внешней энергии будет располагаться на границе между первым и вторым слоем. Если ЭМ является абсолютно прозрачным, то источник внешней энергии будет находиться на границе между вторым и третьем слоями. Первый и второй слои будут играть роль стоков тепла. Чем выше их теплоемкость, тем больше тепла они будут отбирать. В первом случае реакция инициируется ближе к левой внутренней границе; во втором случае ближе к правой границе (на рисунках не показано).

Заметим, что при условиях $L_1 \to \infty$ и $L_3 \to \infty$ имеется возможность оценить время начала химической реакции аналитически. Для этого можно воспользоваться аналитическими решениями инертных задач теплопроводности, содержащимися в [10] и квазистационарным критерием. Этот критерий наиболее подходит для подобных задач, так как в условиях сопряженного теплообмена максимум температуры сдвигается в объем ЭМ.

Далее примем: $\sigma_1 = 0 \ \ см^{-1}$, $\sigma_2 = 50 \ \ см^{-1}$, $\sigma_3 = 300 \ \ см^{-1}$; $f_1 = 0$, $f_2 = 0.35$, $f_3 = 0.8$. Параметры химической реакции ЭМ: $Q = 1000$ Дж/см^2, $k_0 = 100000000 \ c^{-1}$, $E = 100000$ Дж/моль.

Для образца ЭМ конечных размеров интерес представляет такая величина как время полупериода химической реакции, которое определим по значению среднеинтегральной степени превращения, равной 0.5. Время полупериода химической реакции зависит от всех параметров модели. Значительный интерес представляет влияние оптических свойств.

Исследуем, как отразится изменение оптических свойств на характер протекания химической реакции. Для этого будем строить зависимости полупериода химической реакции от плотности теплового потока для разных значений исследуемого параметра.

Сначала изучим влияние изменения коэффициента отражения границы второго слоя на характер протекания химической реакции. Построим зависимости полупериода химической реакции для двух разных случаев (Рисунок 2).

Чем выше плотность потока излучения, тем, очевидно, быстрее начинается реакция и образуется половина продукта. Чем меньше коэффициент отражения, тем больше тепла попадает в ЭМ, тем выше температура, тем быстрее протекает химическая реакция. Результат справедлив не только для заданных теплофизических свойств материалов, но и при их изменении. Так как коэффициент отражения, показывает долю отраженной энергии от границы второго слоя, данные полученные нами справедливы, потому что с уменьшением коэффициента отражения увеличивается доля поглощенной энергии, а значит и температура, и, следовательно, химическая реакция будет проходить быстрее, так как она напрямую зависит от величины полученной энергии. Увеличение потерь тепла в инертные материалы будет приводить к затягиванию нагрева ЭМ и замедлению реакций.

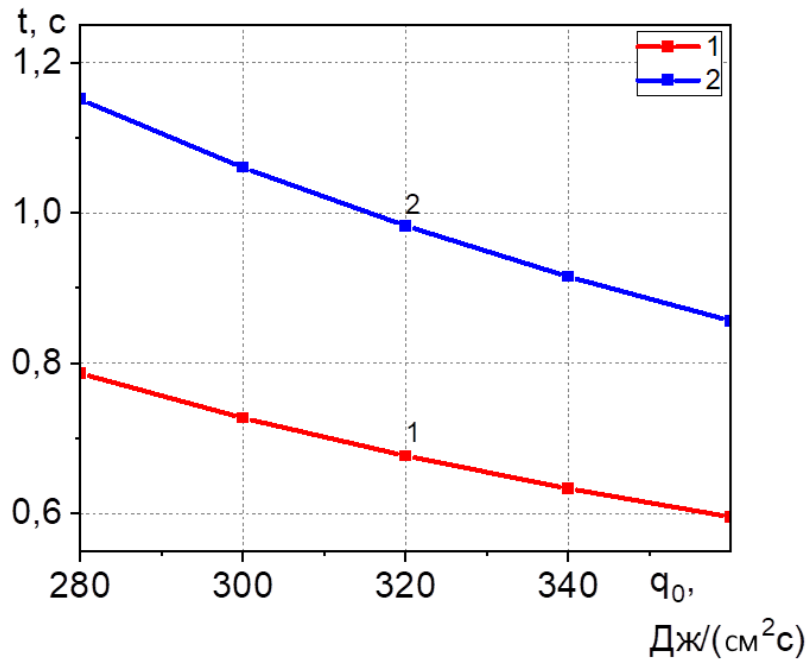


Рисунок 2 – Зависимости полупериода химической реакции от величины плотности теплового потока для разных значений коэффициента отражения границы второго слоя: 1 – 0.1, 2 – 0.35

Далее исследуем влияние показателя поглощения ЭМ на характер протекания химической реакции. Для этого построим зависимости полупериода химической реакции от плотности теплового потока для разных значений показателя поглощения ЭМ (Рисунок 3).

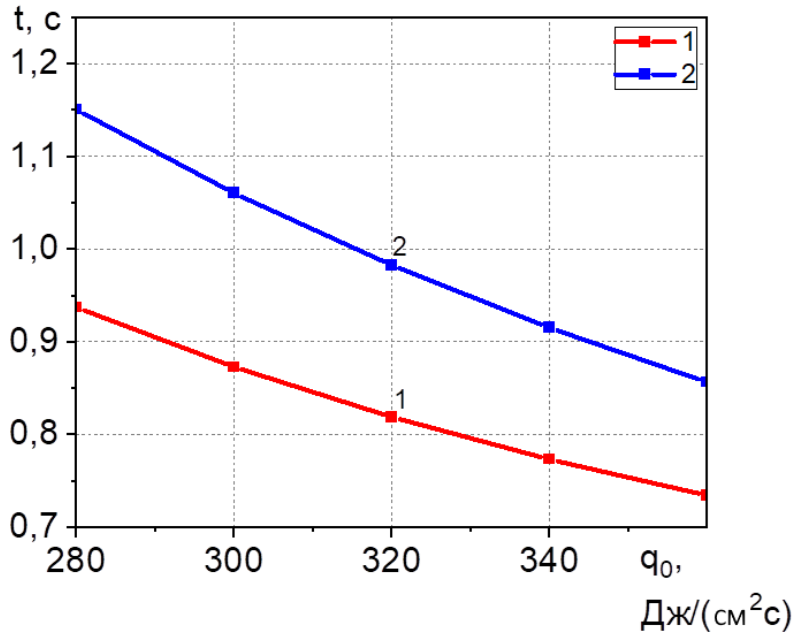


Рисунок 3 – Зависимости полупериода химической реакции от величины плотности теплового потока для разных значений коэффициента поглощения второго слоя: 1 – 1000 $см^{-1}$, 2 – 50 $см^{-1}$

Из полученных зависимостей можно сделать заключение о влиянии коэффициента поглощения ЭМ на характер протекания химической реакции. Можно заметить, что чем больше коэффициент поглощения, тем быстрее будет протекать химическая реакция в ЭМ. Показатель поглощения характеризует то расстояние, на котором поглощается энергия. Чем он выше, тем меньше область поглощения и, следовательно, зона прогрева. Но тем выше и температура в этой зоне. Чем меньше показатель поглощения ЭМ, тем большая часть материала подвергается нагреву, но температура при том уменьшается. Это говорит о том, что в общем случае зависимость времени полупериода химической реакции от показателя поглощения может быть неоднозначной.

Заключение

Таким образом, в работе описана модель инициирования реакции излучением в условиях сопряженного теплообмена. Показано, что время полупериода химической реакции зависит от оптических свойств материалов. Изменяя эти свойства, мы получим различные режимы протекания химической реакции. В реальных условиях изменять оптические свойства можно характером обработки поверхностей, добавлением поглощающих включений или, наоборот, повышением однородности материалов.

Библиографический список

1. Итышев И. К. О проблемах пожарной безопасности твердых бытовых отходов и мест их хранения / И. К. Итышев, С. О. Потапова // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы : материалы науч. конф. – Воронеж, 2018. – Т. 1, № 9 – С. 292–300.
2. Лысак И. А. Решение уравнения теплопроводности для некоторых задач стройиндустрии / И. А. Лысак // Ползуновский альманах. – 2011. – № 1. – С. 65–68.
3. Описание сопряженной задачи теплообмена в половолоконных мембранах / Х. Р. Блягоз, А. А. Схаляхова, Е. П. Кошевой, А. Г. Верещагин // Вестник ВГУИТ. – 2012. – № 2. – С. 17–20.
4. Князева А. Г. Инициирование разложения полупрозрачной смеси энергетических материалов импульсом лазерного излучения / А. Г. Князева, В. Е. Зарко // Физика горения и взрыва. – 2018. – № 1. – С. 108–117.
5. Александров Е. И. Влияние поглощающих примесей на зажигание взрывного вещества лазерным излучением / Е. И. Александров, А. Г. Вознюк, В. П. Ципилев // Физика горения и взрыва. –1989. – № 1. – С. 3–7.
6. Начальные процессы взрывного разложения азидов тяжелых металлов / В. М. Лисицын, Ю. Н. Журавлев, В. И. Олешко [и др.] // Химическая физика. – 2006. – Т. 25, № 2. – С. 59–64.
7. Высокоморная О. В. тепломассоперенос при локальном нагреве и зажигании жидкого топлива сфокусированным потоком излучения / О. В. Высокоморная, Г.

В. Кузнецов, П. А. Стрижак // Известия ТПУ. – 2010. – Т. 316, № 4. – С. 29–33.
8. Буркина Р. С. Инициирование реакционно-способного вещества потоком излучения при его поглощении оптическими неоднородностями вещества / Р. С. Буркина, Е. Ю. Морозова, В. П. Ципилев // Физика горения и взрыва. – 2011. – Т. 47, № 5. – С. 95–105.
9. Князева А. Г. Особенности нагрева лазерным излучением полупрозрачного материала, помещенного между стеклянной и металлической пластинами / А. Г. Князева, В. Е. Зарко // Известия вузов. Физика. – 2014. – Т. 57, № 9, ч. 3. – С. 70–75.
10. Дик И. Г. Приближенный расчет характеристик зажигания в условиях сопряженного теплообмена / И. Г. Дик, А. Г. Князева ; Томский гос. ун-т. – Томск, 1989. – 23 с. – Деп. в ВИНИТИ РАН 25.10.1989 № 6441-В.
11. Knyazeva A. G. On the selection of source parameters for quenching and surface heat treatment processes / A. G. Knyazeva, V. E. Demidov // Mashinostroenie. Setevoi Electron. – Moscow, 2015. – P. 17–31.

УДК 621.373

Патраков В.Е., Лисовский Д.А.

МОЩНЫЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ГЕНЕРАТОР НА ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

Аннотация. Высокочастотная (ВЧ) энергия широко применяется во многих технологических процессах. Одним из основных компонентов типичной ВЧ системы является ВЧ генератор, который подводит мощные ВЧ колебания к нагрузке. Для повышения эффективности и компактности ВЧ генераторы можно проектировать на основе транзисторов, но обычно при этом используются специализированные ВЧ транзисторные сборки, которые сильно повышают стоимость таких ВЧ генераторов. В данном исследовании было показано, что мощный ВЧ генератор с высоким КПД может быть создан на основе дешевых неспециализированных MOSFET-транзисторов. Прототип генератора с использованием транзисторов IRFB4020 был сконструирован с использованием схемы Класс D с Переключением Тока (Current Mode Class D, CMCD). Генератор обеспечивает ВЧ мощность более 200 Вт на 50-омной нагрузке, при этом КПД достигает 89%.

Ключевые слова: высокочастотный генератор, класс D с переключением тока.

Abstract. Radio frequency (RF) energy is widely used in many technological processes. One of the main components of a typical RF system is RF generator, which supplies powerful RF oscillations to the load. Transistor-based generators are efficient and compact, but usually utilize specialized RF transistor assemblies, which significantly increases the cost of the RF generator. In this study it was shown that a powerful high efficiency RF generator can be built using cheap non–specialized MOSFETs. The test generator utilizing IRFB4020 MOSFETs was built using Current Mode Class D circuit. This allowed the generator to achieve an efficiency of 89% at an output power of 200 W supplied to a 50-ohm load.

Keywords: radio frequency generator, current mode class D.

Введение

Высокочастотная (ВЧ) энергия широко применяется во многих технологических процессах, например в обработке и стерилизации поверхностей ВЧ плазмой [1]. Основной компонент типичной ВЧ системы – высокочастотный генератор, создающий мощные ВЧ колебания в нагрузке. Центральным компонентом такого генератора является высокочастотный активный элемент. Существует два основных типа таких элементов: электронные лампы и транзисторы. Генераторы на электронных лампах имеют такие преимущества, как относительная легкость создания генераторов киловаттного уровня мощности и устойчивость к неноминальным режимам работы (короткое замыкание, холостой ход). С другой стороны, неоспоримым достоинством генераторов на основе транзисторов является высокая эффективность, которая значительно снижает проблемы с отводом тепла; компактность; отсутствие высоких напряжений (единицы киловольт), присущих

генераторам на электронных лампах. Тем не менее, типичная транзисторная структура, по сравнению с современными генераторными лампами, имеет более ярко выраженные паразитные параметры, в первую очередь – паразитные емкости, усложняющие использование транзисторов в ВЧ генераторах. Стандартное решение этой проблемы – применение специализированных высокочастотных транзисторных сборок [2], которые оптимизированы для работы на высокой частоте, так как имеют меньшие или скомпенсированные значения паразитных емкостей и индуктивностей. Конечно, применение таких сборок в ВЧ генераторе значительно повышает его себестоимость.

В данной работе исследовалась возможность создания мощного ВЧ генератора на основе неспециализированных полевых (MOSFET) транзисторов общего назначения. Были теоретически проанализированы проблемы, усложняющие разработку такого устройства, после чего было предложено и реализовано подходящее схемотехническое решение.

Методика эксперимента

Работа транзисторов в ключевом режиме, который также называется класс D, обычно используется для уменьшения потерь в транзисторах и повышения эффективности устройства. Рабочая частота инверторов на основе полевых МОП-транзисторов, таких как импульсные источники питания и усилители звука класса D, находится в диапазоне от 100 кГц до 1 МГц, в то время как для работы ВЧ генератора требуется частота переключения порядка 10 МГц и выше. Верхний предел рабочей частоты полевых МОП-транзисторов общего назначения в ВЧ генераторе в основном определяется потерями в транзисторах и, как следствие, снижением эффективности генератора. Потери в МОП-транзисторах можно разделить на три основных типа: потери проводимости, потери переключения и паразитные потери. Рассмотрим три этих типа более подробно, чтобы определить, какой из них будет ограничивающим фактором увеличения частоты.

Потери проводимости возникают, когда через канал открытого полевого МОП-транзистора протекает ток. Эти потери обычно характеризуются в технических характеристиках транзисторов параметром «Статическое сопротивление открытого канала» ($R_{ds(on)}$). Мощность потерь проводимости P_c может быть рассчитана по закону Джоуля-Ленца

$$P_c = I^2 \cdot R_{ds(on)}, \quad (1)$$

где I – ток, проходящий через транзистор. При фиксированном уровне выходной мощности и тока эти потери остаются неизменными с увеличением частоты, поэтому они не являются ограничивающим фактором для увеличения рабочей частоты.

Потери переключения (коммутационные потери) возникают, когда полевой МОП-транзистор переключается между полностью открытым и полностью закрытым состояниями, и транзистор проходит через линейный участок кривой усиления. При этом мощность, рассеиваемая на транзисторе, пропорциональна напряжению сток-исток и амплитуде переключаемого тока. Чтобы уменьшить потери переключения, устройство должно проходить линейную область как можно быстрее, что характеризуется в технических характеристиках параметрами «t_r» и «t_f», также известными как времена переключения, которые представляют собой время нарастания и время спада напряжения сток-исток во время переключения. Для эффективной работы они должны быть невелики по сравнению с периодом рабочей частоты. Современные полевые МОП-транзисторы общего назначения могут обеспечивать времена переключения близкие к 10 нс, в то время как период желаемой рабочей частоты (около 10 МГц) приблизительно составляет 100 нс. Следовательно, аккуратный выбор МОП-транзистора может обеспечить умеренные потери при переключении.

Наконец, паразитные потери – это потери, вызванные внутренними паразитными параметрами транзистора. В основном они определяются выхолной емкостью транзистора («C_{oss}» в технических характеристиках). Обычно эта емкость лежит в диапазоне от десятков пФ до единиц нФ. В стандартных схемах, таких как полумостовая топология или топология «пуш-пулл», эта емкость заряжается, когда полевой транзистор закрыт, и разряжается на канал транзистора, когда он открывается. Энергия, накопленная в этой емкости, рассеивается в канале транзистора один раз за каждый цикл переключения, поэтому паразитные потери прямо пропорциональны рабочей частоте. Например, при напряжении сток-исток 200 В, рабочей частоте 10 МГц и емкости C_{oss}, равной 500 пФ, потери будут равны 100 Вт на каждый транзистор даже на холостом ходу генератора.

Как можно видеть, на высоких частотах полные потери в МОП-транзисторе общего назначения в основном состоят из коммутационных потерь и паразитных потерь. Условием эффективной работы таких транзисторов на ВЧ является снижение этих потерь. Этого можно добиться путем тщательного подбора транзисторов с минимальными временами переключения и емкостью C_{oss}. Еще одной важной для данного применения характеристикой МОП-транзистора является заряд затвора «Q_g». Драйвер транзистора должен обеспечивать быструю зарядку и разрядку затвора транзистора, поэтому заряд затвора должен быть выбран минимально возможным, чтобы снизить нагрев схемы драйвера.

С другой стороны, можно заметить, что и коммутационные, и паразитные потери сильно зависят от напряжения сток-исток транзистора перед переключением. Если спроектировать ВЧ генератор с использованием схемы, обеспечивающей условие переключения в нуле напряжения (ZVS, Zero Voltage Switching) на стоке

МОП-транзистора, напряжение в момент будет нулевым, что автоматически устраняет как потери переключения, так и паразитные потери. Описанная в работе конструкция ВЧ генератора была выполнена с учетом вышеупомянутых соображений и принципов. Рабочая частота ВЧ генератора была выбрана равной 13,56 МГц, одной из широко используемых частот международного диапазона ISM (Industry, Science and Medicine – Промышленность, Наука и Медицина).

В качестве активного элемента были выбраны транзисторы модели IRFB4020 фирмы Infineon. Эта модель представляет собой N-канальный силовой полевой МОП-транзистор в корпусе TO-220AB и предназначена для использования в усилителях звука класса D, поэтому предполагаемая частота переключения составляет до 1-2 МГц. В таблице 1 указаны справочные характеристики транзисторов IRFB4020.

Таблица 1 – Сравнение параметров некоторых МОП-транзисторов общего назначения

Параметр	IRFB4020	IRF640N	IRFP240
Напряжение сток-исток V_{DS}	200 В	200 В	200 В
Постоянный ток стока I_D	18 А	18 А	20 А
Задержка включения $t_{d(on)}$	7.8 нс	10 нс	14 нс
Время нарастания t_r	12 нс	19 нс	51 нс
Задержка выключения $t_{d(off)}$	16 нс	23 нс	45 нс
Время спада t_f	6.3 нс	5.5 нс	36 нс
Полный заряд затвора Q_g при $V_{GS} = 15$ В	25 нКл	60 нКл	65 нКл
Выходная емкость C_{oss} при $V_{DS} = 25$ V	110 пФ	185 пФ	400 пФ

Значения характеристик данного транзистора уже дают ему преимущество в рабочей частоте по сравнению с большинством других полевых МОП-транзисторов общего назначения, таких как IRF640N (200 В, 18 А), IRFP240 (200 В, 20 А), с которыми IRFB4020 сравнивается в таблице 1. Следует отметить, что хотя транзистор IRFB4020 оптимизирован для работы в классе D, он все же может считаться полевым МОП-транзистором общего назначения, что проявляется как в его стандартном корпусе TO-220, так и в его цене, которая находится на уровне упомянутых IRF640N, IRFP240, и намного меньше, чем у специализированных ВЧ транзисторных сборок, таких как ARF460BG от Microsemi.

Схема ВЧ генератора была выбрана, чтобы удовлетворять условию ZVS, упомянутому ранее. Довольно популярной схемой для проектирования ВЧ генераторов является Current Mode Class D (CMCD, Класс D с Переключением Тока) [3], которая показана на рисунке 1. Эта схема представляет собой вариацию Пуш-Пулл инвертора, в котором транзисторы переключаются в противофазе и обеспечивают на нагрузке прямоугольный сигнал. Однако, схема CMCD имеет

отличается наличием настроенного LC-контура, включенного параллельно выходу, который подавляет высшие гармоники прямоугольного сигнала, оставляя на выходе синусоидальный сигнал. Это позволяет транзисторам переключаться в моменты, когда синусоидальное напряжение на выходе пересекает ноль, тем самым обеспечивая выполнение условия ZVS. Дополнительным преимуществом такой схемы является то, что она позволяет включать выходную емкость транзистора в емкость LC-контура, что позволяет почти идеально настроить схему, несмотря на влияние паразитных параметров транзисторов.

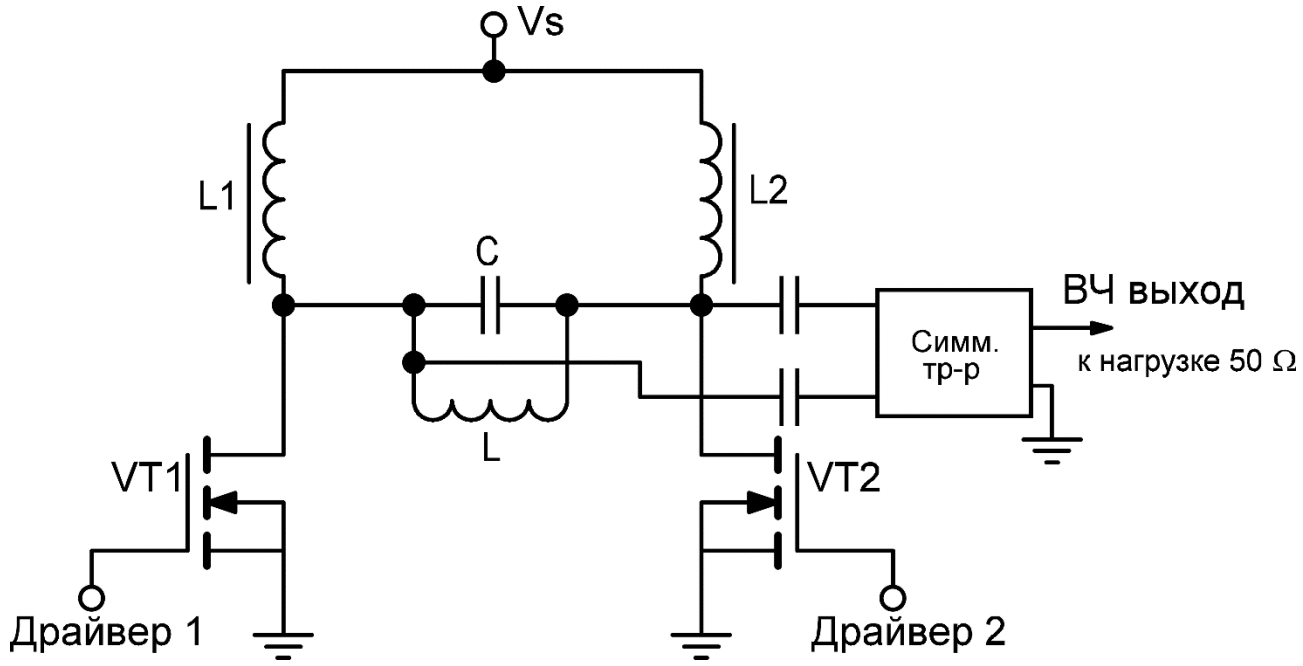


Рисунок 1 – Схема Current Mode Class D, использованная в данной работе; симм. тр-р – симметрирующий трансформатор

Генератор был спроектирован для работы на стандартную нагрузку 50 Ом, предпочтительно несимметричную. Это позволит использовать стандартные коаксиальные кабели для передачи ВЧ энергии в нагрузку. Поскольку схема CMCD является симметричной, между генератором и нагрузкой должен быть установлен симметрирующий трансформатор. Такой трансформатор можно легко сконструировать для работы в желаемой полосе частот, используя отрезки коаксиального кабеля. Этот тип конструкции известен как трансформатор на длинных линиях (ТДЛ) [4-6].

Для переключения полевых МОП-транзисторов на высоких частотах требуется, чтобы схема драйвера обеспечивала достаточно высокие импульсные токи. Анализ доступных микросхем-драйверов затвора на показал, что для минимального времени переключения можно использовать драйверы семейства UCC2752x. Эти драйверы могут обеспечивать времена нарастания и спада 7 нс и 6 нс

соответственно. При этом возникают сомнения в надежности работы схемы, учитывая, что драйверы будут работать на частотах, намного превышающих предполагаемые производителем. Основная проблема заключается в отводе тепла от микросхем: мощность управления можно оценить примерно в 5 Вт на транзистор, а микросхемы UCC2752x выпускаются в небольшом корпусе SOIC-8 без особых возможностей охлаждения. Для облегчения теплового режима схемы драйвера было решено подключить несколько микросхем UCC2752x параллельно и реализовать активное охлаждение модуля драйвера. Поскольку общее количество мощности, рассеиваемой драйверами, относительно невелико (около 10 Вт), система охлаждения драйвера не должна быть большой: один вентилятор или несколько небольших радиаторов, установленных на микросхемы, смогут обеспечить необходимое охлаждение.

Напряжение питания для генератора V_S было выбрано равным 48 В. Учитывая, что транзистор IRFB4020 рассчитан на 200 В напряжения сток-исток, и что LC-контур схемы CMCD обеспечивает повышение напряжения в π раз [2], напряжение питания должно быть ниже 200 В примерно в 4 раза, чтобы обеспечить необходимый запас. Стандартное значение 48 В обеспечит около 220 Вт ВЧ мощности P в 50-Омной нагрузке, что следует из формулы

$$P = \frac{\pi^2 \cdot V_S^2}{\left(\sqrt{2}\right)^2 \cdot Z_{load}} = \frac{3.14^2 \cdot 48^2}{2 \cdot 50} = 227 \text{ Вт.} \quad (2)$$

где Z_{load} – импеданс нагрузки генератора, равный 50 Ом.

Конструкция

Общий вид сконструированного ВЧ генератора показан на рисунке 2. Основой для силовой части служит радиатор размером 100x90x25 мм, на который установлены транзисторы. Между транзисторами и радиатором установлены изолирующие теплопроводящие подложки из оксида алюминия толщиной 0,6 мм и нанесена термопаста КПТ-8.

Модуль драйвера и LC-контур были установлены прямо на транзисторах, для снижения длины всех соединительных проводников и минимизации паразитных индуктивностей. LC-контур между стоками полевых транзисторов должен иметь максимально достижимую добротность для более эффективного выделения основной частоты. Добротность нагруженного параллельного LC-контура Q обратно пропорциональна ее характеристическому сопротивлению Z_{LC}:

$$Q = \frac{Z_{load}}{Z_{LC}} = Z_{load} \cdot \frac{\sqrt{C}}{\sqrt{L}}, \quad (3)$$

где L – индуктивность катушки контура, C – емкость конденсатора контура.

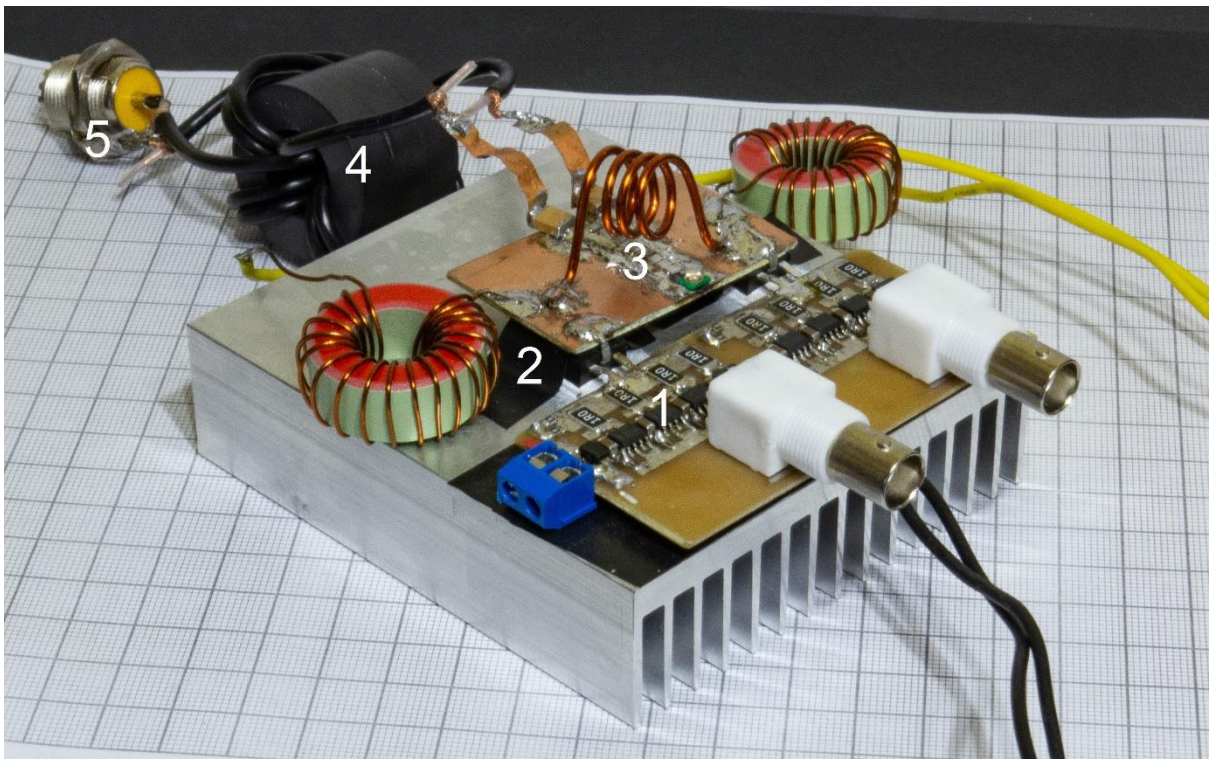


Рисунок 2 – Общий вид сконструированного генератора; 1 – модуль драйвера, 2 – силовая часть, 3 – LC-контур, 4 – симметрирующий трансформатор, 5 – выходной разъем UHF

Из формулы видно, что значение емкости конденсатора *C* должно быть выбрано как можно более высоким, а значение индуктивности катушки *L* – как можно более низким. Когда значение *L* настолько мало, что становится сопоставимым с паразитными индуктивностями схемы, система перестает работать в необходимом режиме. Это ограничивает минимально возможное значение *L* и максимально возможное значение нагруженной добротности. Как правило, реализуется нагруженная добротность, равная 3. В этом исследовании стабильная работа устройства была достигнута при значении индуктивности, равном 125 нГн, что соответствует нагруженной добротности контура, равной 4,6, и значению емкости конденсатора *C* 1080 пФ. Выходные емкости полевых МОП-транзисторов, которые составляют порядка нескольких десятков пФ, входят в суммарную емкость LC-контура. Основная часть емкости контура состоит из десяти параллельных керамических SMD-конденсаторов емкостью 100 пФ в корпусе 1206 с диэлектриком NP0 с низкими потерями. Поскольку выходная емкость полевого транзистора зависит от напряжения сток-исток, LC-контур должен быть настроен при полном рабочем напряжении питания 48 В. Изменение напряжения питания требует небольшой перестройки контура, чего можно добиться, изменяя расстояние между витками резонансной индуктивности. Поскольку по этой индуктивности будет протекать резонансный ток около 9,8 А (среднеквадратичное значение), она должна быть

изготовлена из относительно толстого провода. Была использован медный лакированный провод диаметром 1,6 мм. Катушка состоит из 4 витков с диаметром витка 11 мм и шагом намотки 3 мм. Точная геометрия была подобрана экспериментально в процессе настройки.

Схема драйвера транзисторов была построена с использованием 8 микросхем UCC27524, подключенных по 4 параллельно на каждый полевой транзистора. Выход каждой микросхемы подключен к затвору соответствующего транзистора через резистор сопротивлением 1 Ом, чтобы предотвратить протекание больших сквозных токов между выходами микросхем. Два отдельных тактовых сигнала, поступающие на входы микросхем, генерировались внешним генератором прямоугольных импульсов. Входной прямоугольный сигнал должен иметь тщательно отрегулированный коэффициент заполнения для учета задержек в микросхемах драйвера и задержки включения МОП-транзисторов. Однако, экспериментально было установлено, что коэффициент заполнения входного сигнала 50% является оптимальным для работы данного устройства. На модуль драйвера подавалось напряжение питания 15 В, а во время работы потреблялся постоянный ток 1,1 А. Это означает, что в системе управления рассеивается мощность около 15 Вт. Эта мощность распределяется между транзисторами и микросхемами драйвера. Для отвода тепла над микросхемами был установлен охлаждающий вентилятор диаметром 50 мм. Основного радиатора, на котором установлены транзисторы, более чем достаточно для рассеивания выделяющегося на них дополнительного тепла.

Симметрирующий трансформатор был изготовлен с использованием двух отрезков коаксиального кабеля RG-174, соединённых по трехпроводной схеме Рутроффа [5, 7]. Кабель был намотан на сердечник, состоящий из трех ферритовых тороидов из феррита квадратного сечения, каждый из которых имел внешний диаметр 32 мм, внутренний диаметр 16 мм и высоту 8 мм. Выбранный ферритовый материал M50BH от фирмы Ферроприбор способен работать на частотах до 100 МГц и имеет начальную магнитную проницаемость, равную 50. Каждым кабелем было намотано на сердечник 4 витка. В результате индуктивный импеданс кабеля составил около 400 Ом с учетом магнитной связи между кабелями.

Спроектированный ВЧ генератор имеет в своей конструкции несколько ВЧ дросселей. ВЧ-дроссели между стоком каждого полевого транзистора и источником постоянного тока, а также катушка индуктивности входного П-фильтра, были намотаны 20 витками на сердечниках T106 из порошкового железа (материал №18 по зарубежной классификации), при этом значения индуктивности составили 28 мкГн. Емкости в П-фильтре состояли из трех параллельных SMD-конденсаторов каждая. Конденсаторы обладали емкостью 0,22 мкФ, максимальным допустимым напряжением 630 В, с диэлектриком X7R в корпусе 2220. Такие же конденсаторы использовались между транзисторами и симметрирующим трансформатором, чтобы

развязать выход генератора по постоянному току. Все сигнальные линии и подводящие провода постоянного тока, идущие к генератору, были оснащены дросселями синфазного сигнала, изготовленными из ферритовых фильтров-защелок различных размеров.

Экспериментальные результаты

При напряжении питания 48 В сконструированный генератор при обеспечивает непрерывную мощность 196 Вт на частоте 13,56 МГц на нагрузке 50 Ом. Коэффициент гармонических искажений (КГИ) выходного сигнала равен 2,5%. Потребляемая мощность постоянного тока составляет 221 Вт, следовательно, КПД генератора составляет 89%, при этом 25 Вт расходуется на нагрев. На рисунке 3 показана зависимость выходной мощности и КПД генератора от напряжения питания. Основными источниками потерь являются катушка LC-контура, которая при работе нагревается до 105 градусов, и симметрирующий трансформатор, который нагревается до 65 градусов. Было установлено, что потери в симметрирующем трансформаторе вызваны в основном потерями в кабеле RG-174. Намотка симметрирующего трансформатора кабелем более высокого качества, например RG-316, приведет к снижению потерь и повышению общей эффективности.

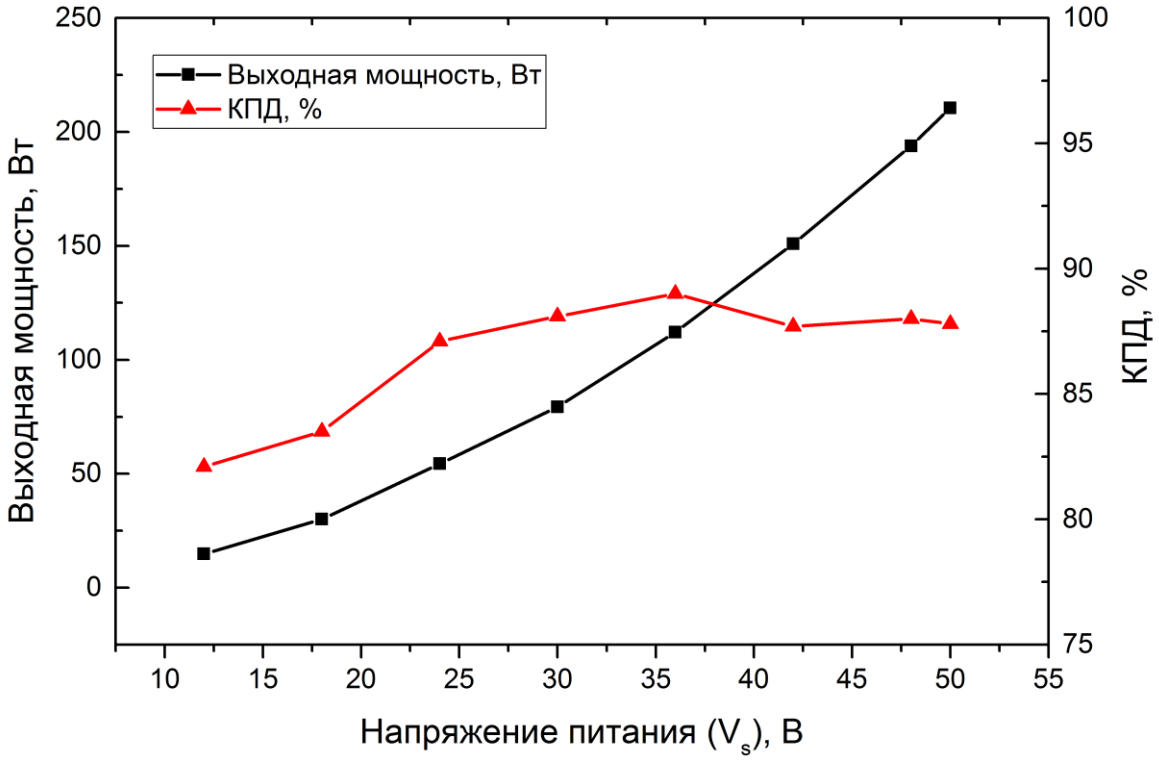


Рисунок 3 – Зависимость выходной ВЧ мощности и КПД генератора от величины питающего напряжения V_s

Полные потери в МОП-транзисторах были оценены на уровне 15 Вт, включая 10 Вт рабочих потерь и 5 Вт потерь на управление. Долговременный тест работы генератора на полной мощности в течение 30 минут показал, что тепловое равновесие достигается довольно быстро и температура радиатора не поднимается выше 45 градусов, поэтому не было применено активного охлаждения радиатора.

Охлаждение модуля драйвера оказалось очень важным для надежной работы всего генератора. Без активного охлаждения микросхемы драйвера быстро перегревались выше максимально допустимой температуры в 120 градусов, что вынуждало вводить паузы на их охлаждение в работу генератора. Добавление вентилятора диаметром 50 мм, непосредственно обдувающего микросхемы, позволило им достигнуть теплового равновесия при приемлемом значении температуры в 75 градусов, после чего генератор может работать неограниченно долго без перегрева.

Заключение

В ходе проведённого исследования было установлено, что высокочастотный генератор с высоким КПД может быть построен с использованием неспециализированных полевых МОП-транзисторов общего назначения путем тщательного подбора активного элемента и подходящих схемотехнических решений. Прототип генератора с рабочей частотой 13,56 МГц был разработан и построен с использованием полевых МОП-транзисторов IRFB4020 и схемы Класс D с Переключением Тока (CMCD, Current Mode Class D), которая обеспечивает переключение полевых МОП-транзисторов в нуле напряжения. При напряжении питания 48 В и выше генератор может обеспечивать ВЧ мощность более 200 Вт с КПД 89% на стандартной нагрузке 50 Ом. Потери мощности, непосредственно вызванные полевыми МОП-транзисторами, оцениваются в диапазоне 10-15 Вт, в то время как оставшиеся 15 Вт потерь вызваны другими элементами схемы, в основном симметрирующим трансформатором и резонансным контуром. Это позволяет оценить идеальную эффективность преобразования постоянного тока в ВЧ энергию для используемых полевых транзисторов на уровне около 95%. Результаты, достигнутые в данном исследовании, дают основания полагать, что предлагаемая идеология построения ВЧ генераторов имеет потенциал для технологических применений более высокой мощности. Большой интерес представляет исследование применения данной идеологии к построению генераторов суб-киловаттного и киловаттного уровней мощности.

Библиографический список

1. Plasma sterilization using glow discharge at atmospheric pressure / T. Akitsu, H. Okawa, M. Tsuji, H. Kimura // Surface and Coatings Technology. – 2005. – Vol. 193, Iss. 1/3. –

P. 29–34.
2. A 13.56 MHz high power and high efficiency RF source / A. Gupta, Y. Arondekar, S. V. G. Ravindranath [et al.] // Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International 2013 Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2013. – Vol. 1. –P. 1–4.
3. Kobayashi H. Current-mode class-D power amplifiers for high-efficiency RFapplications / H. Kobayashi, J. Hinrichs, P. M. Asbeck // Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International 2001 Transactions on Microwave Theory and Techniques. –2001. – Vol. 49, Iss. 12. – P. 2480–2485.
4. Радиопередающие устройства : учеб. для вузов / под ред. В. В. Шахгильдяна. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Радио и связь, 2003. – 560 с. – ISBN 5-25-601-2-371.
5. Шахгильдян В. В. Проектирование радиопередатчиков : учеб пособие для вузов / В. В. Шахгильдян, М. С. Шумилин, В. Б. Козырев. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Радио и связь, 2000. – 656 с. – ISBN 5-256-01-3785.
6. Rotholz E. Transmission-Line Transformers / E. Rotholz // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1981. – Vol. 29, Iss. 4. – P. 327–331.
7. Ruthroff C. L. Some Broad-Band Transformers / C. L. Ruthroff // Proceedings of the IRE. – 1959. – P. 1337–1342.

УДК 620.186.4

Рыбалко В.Г., Новгородов Д.В., Сурков А.Ю., Рогова Е.А.

ФРАКТОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ.

Аннотация. В статье представлены результаты фрактографического исследования поверхности разрушения лопатки турбины высокого давления с усталостной трещиной. Исследование рельефа излома показало, что на поверхности излома лопатки вблизи задней кромки имеется зона хрупкого транскристаллического и межзеренного разрушения, окруженная внутризеренной поверхностью разрушения с развитым микрорельефом. Дальнейший рост трещины в направлении передней кромки осуществлялся по усталостному механизму. В результате было установлено, что основной причиной выхода из строя лопатки является образование и развитие усталостной трещины в направлении от задней кромки профиля к передней кромке.

Ключевые слова: Турбина высокого давления, рабочие лопатки, долговечность лопаток, малоцикловая усталость.

Abstract. The paper presents the results of a factual study of the fracture surface of a high-pressure turbine rotor blade with a fatigue crack. The study of the fracture relief showed that on the fracture surface of the blade near the trailing edge there is a zone of brittle transcrystalline and intergranular fracture, surrounded by an intragranular fracture with a developed microrelief. Further crack growth in the direction of the leading edge was carried out by a fatigue mechanism. As a result, it was found that the main cause of blade failure is the formation and development of a fatigue crack in the direction from the trailing edge of the airfoil to the leading edge.

Keywords: High pressure turbine, rotor blades, blade durability, low cycle fatigue.

Введение

Объектом исследования являлась лопатка турбины высокого давления с эксплуатационными разрушением в виде трещины в пере лопатки. Цель работы – исследование с помощью фрактографических методов характера изломов лопатки, в зоне разрушения и определение возможных причин разрушения.

В процессе работы проведена идентификация лопатки и оценка ее внешнего состояния, исследованы рельеф эксплуатационных изломов. Исследование выполнялось с использованием методов, оптической микроскопии и сканирующей электронной микроскопии.

Внешним обследованием поверхности пера лопатки установлено, что в процессе эксплуатации лопатка подвергалась ремонтным операциям (механической зачистке, сварочно-наплавочному восстановлению кромок пера).

В результате фрактографических исследований установлено, что причиной разрушения лопатки является образование и развитие усталостной трещины в направлении от выходной кромки пера к входной кромке. Зарождение трещин (образование очага) произошло в приповерхностном слое металла выходной кромки по типу объёмного растрескивания от действия высоких нагрузок, соответствующих пределу прочности материала. Воздействие высоких нагрузок было кратковременным. Дальнейшее развитие трещин происходило под действием вибрационной нагрузки. Форма очага по типу объёмного растрескивания позволяет предполагать, что причиной его образования является сложное напряженное состояние в пере лопатки, возникшее в результате кратковременной перегрузки, возможно термического происхождения.

На основании полученных результатов исследований сделано заключение, что вероятной причиной образования хрупких трещин в приповерхностном слое выходных кромок являлось проведение на лопатке термических (сварочно-наплавочных) ремонтных работ.

Методика исследования

Проводилось исследования рабочей лопатки турбины высокого давления агрегата ГТК-10-4, имеющую трещину в пере, возникшую при эксплуатации (рисунок 1). Сведений о материале, производителе, предыстории эксплуатации и ремонтных работ для переданных на исследование лопаток Заказчиком не представлено.

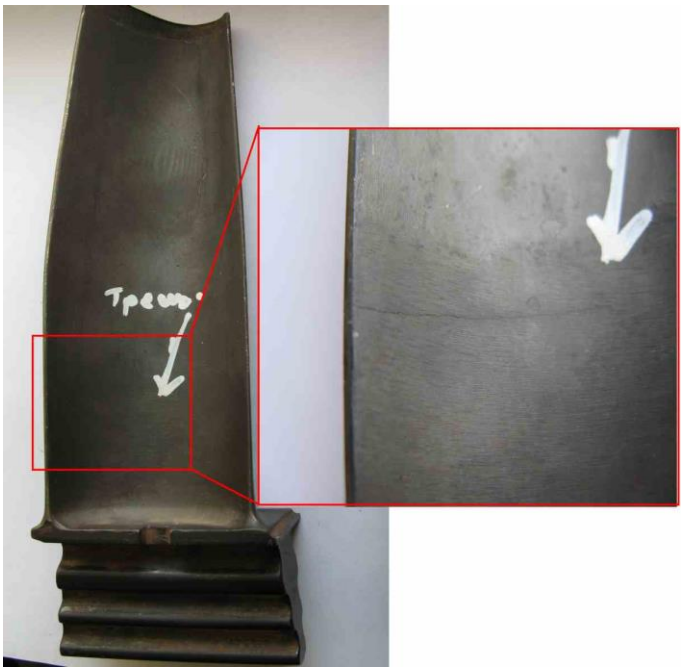


Рисунок 1 – Общий вид рабочего лезвия с трещиной

Подготовка образцов

Для проведения исследований поверхность лопатки была подвергнута общему визуальному осмотру с целью оценки состояния поверхности, а также для определения мест выборки образцов. Для исследований были подготовлены образцы для проведения фрактографического исследования поверхности излома. Раскрытие изломом произведено вследствие абразивной их вырезки по двум параллельным сечениям, расположенных на расстоянии примерно 10 мм по обе стороны от траектории трещин и одном продольном сечении, проходящем через их концевые точки.

Методы исследования

Оценка состояния поверхности лопатки проводилась с использованием стериоскопического микроскопа «Цитоваль» при увеличение до 100 крат.

Для оценки характера разрушений лопатки поверхность раскрытого излома исследовалась с использованием стереоскопического микроскопа «Цитоваль» и растрового электронного микроскопа «Jeol JSM-6390».

Оценка состояния поверхности лопаток

Визуально и с помощью стереомикроскопа «Цитоваль» проведено обследование поверхности пера поврежденной лопатки. На поверхности пера со стороны выходной кромки обнаружены трещины, длиной по корыту 32 мм, расположенная на высоте от полки замка 26 мм, и развивающийся в сторону входной кромки (рисунок 1).

Поверхность лопатки со стороны корыта достаточно однородна, покрыта окисной пленкой преимущественно темно-коричневого цвета. На поверхности спинки цвет неоднороден – от светло коричневатого в нижней части пера, выше, почти до торца, цвет черный с пятнистостью. На поверхности пера лопатки (рисунок 1) выявляются достаточно грубые разнонаправленные риски (следы от примененной механической зачистки). На входных и выходных кромках по всей их длине имеются множественные локальные концентраторы напряжений в виде коротких поперечных рисок от произведенной зачистки и мелкие кратеры с внедренными в них частицами. По-видимому, это следы эрозионного износа поверхности от предшествующей эксплуатации. Кроме того, на отдельных участках кромок наблюдаются «спилы», искажающие их исходный радиус скругления. Прикорневая поверхность спинки имеет поперечную зачистку на высоту 30 мм от полки, выше 30 мм поверхность вдоль обеих кромок зачищена со стороны спинки и корыта. Представленные признаки механического воздействия на перо лопатки свидетельствуют об уже имевшем место ремонте пера и, соответственно, повторном использовании лопатки. На спинке лопаток имеются мелкие кратеры размером до 0,5мм с внедренными в поверхность

мелкими частицами и темные пятна нагара, указывающие на высокую загрязненность поступавшего в период последней эксплуатации газового потока [1].

Торцевая поверхность лопатки со стороны спинки и вдоль входной кромок имеет темный бурый цвет и повышенную по сравнению с остальной поверхностью шероховатость, что указывает на воздействие на эти участки более высоких температур. Верхний край утонений имеет износ с заусенцами вдоль торца, как в сторону корыта, так и спинки, кроме того, наблюдаются срезы металла в угловых зонах у выходных кромок.

Оценка состояния замковой частей выявила явные следы фреттинга (рисунок 2), указывающие на изменение амплитуды их качания, а, следовательно, и на вероятность возникновения резонансных колебаний.

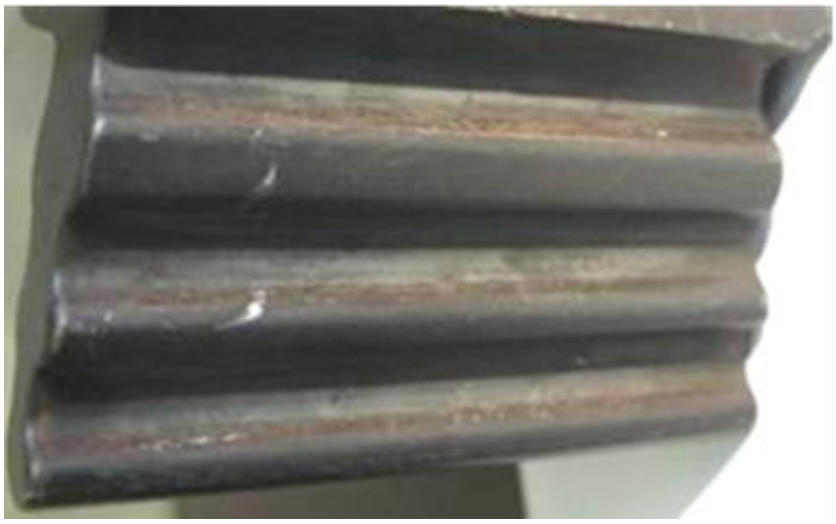


Рисунок 2 – Фретинг износ на замке лопатки

В целом проведенные исследования состояния поверхности поврежденной лопатки выявили общую «картину» неблагоприятных факторов ремонтного и эксплуатационного характера:

- наличие на кромках множественных поверхностных концентраторов напряжений механического происхождения (разнонаправленные царапины зачистки, следы эрозионного износа и мелких вмятин, сохранившегося от предыдущего периода эксплуатации), а также следы некачественно выполненного восстановительного наплавочного ремонта (неоднородные пятна наплавленного металла, застывшие капли металла);
- неоднородная степень окисления и шероховатость поверхности перьевой частей лопатки, свидетельствуют об имевшем место в процессе эксплуатации локальном высокотемпературном воздействии (перегреве) [2];

– наличие пятен нагара вследствие загрязненности воздействовавшего газового потока;
– изменения при ремонте радиусов скругления отдельных участках кромок как результат ремонта;
– неравномерный износ утонений, а также фреттинг на полках замковой части лопатки дает основание полагать, что аварийные лопатки испытывали высокие вибрационные нагрузки [3].

Из совокупности определенных выше неблагоприятных факторов в качестве наиболее вероятной причины, приведшей к разрушению исследуемых лопаток, можно выделить неравномерность высокотемпературного воздействия (как эксплуатационного, так и ремонтного). Это в свою очередь позволяет предполагать, что причиной произошедшего разрушения лопаток могли являться высокие термические напряжений на границе зон пера с наибольшей разностью температур (высокого температурного градиента).

Оценка характера разрушения лопаток

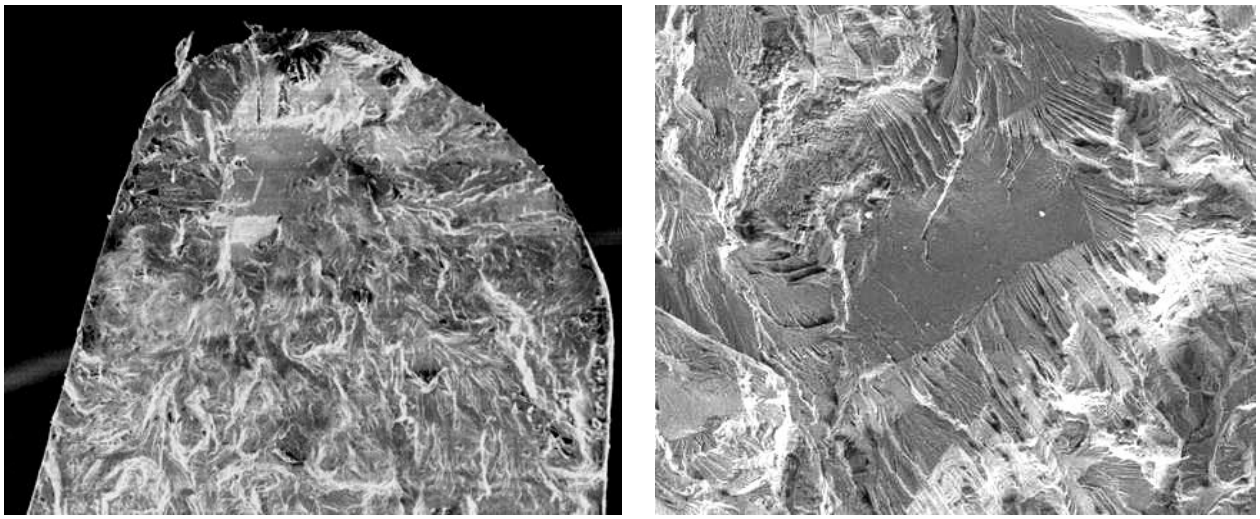
Исследуемая лопатка имела повреждения в виде трещины, расположенной в выходной кромке пера в плоскостях параллельно полке замка. Для исследования поверхности разрушения лопаток из пера были предварительно вырезаны образцы, включавшие зоны разрушения. Общий вид поверхности излома поврежденной рабочей лопатки, полученный после механического раскрытия трещины, представлен на рисунке 4. Поверхность излома – ориентирована нормально оси пера, располагается со стороны выходной кромки лопатки, гладкая, покрыта темной окисной пленкой, а на поверхности видны полуконцентрические линии, то есть содержит признаки усталостного роста. Характерные ростовые полуконцентрические усталостные линии, развивающиеся от выходной кромки в сторону входной, позволяют указать место начала развития трещины со стороны выходной кромки.

Исследование рельефа излома с использованием оптического и растрового электронного микроскопа показало, что на поверхности разрушения лопатки вблизи выходной кромки присутствует зона хрупкого транскристаллитного и межзеренного разрушения, окруженная внутризеренным изломом с развитым микрорельефом.

Анализ поверхности излома лопатки

В пере лопатки зона хрупкого разрушения частично выходит на боковую поверхность пера со стороны корыта (рисунок 3) и имеет форму неправильного эллипса с размерами 550х300мкм, вытянутого от центрального участка поверхности излома, расположенного вблизи торца выходной кромки, к боковой поверхности

лопатки со стороны корыта. Внутризеренный излом, окружающий зону хрупкого разрушения, имеет признаки усталостного развития трещин в виде вязких фасеток с бороздками и веерообразными рубцами, расходящимися от зоны хрупкого излома к наружной поверхности лопатки со стороны выходной кромки в направлении к входной кромке (рисунок 4). Данный характер излома позволяет определить очаг разрушения пера лопатки как зону хрупкого излома около торца выходной кромки. Зона хрупкого разрушения представляет собой преимущественно внутризеренные фасетки, разориентированные относительно друг друга так, что поверхность разрушения этого участка не лежит в плоскости усталостного роста магистральной трещины, то есть образование очага не связано со схемой напряженного состояния от действия рабочих нагрузок [4]. Форма участка хрупкого разрушения (очага) в виде условного эллипса с отношением длины по поверхности лопатки к глубине как 1 к 2 показывает, что образование очага было, по-видимому, подповерхностным с выходом на наружную поверхность со стороны корыта. После этого разрушение развивалось ростом трещин усталостным механизмом.



а б

Рисунок 3 – Вид на поверхность излома пера лопатки со стороны задней кромки: а, – топография роста трещины, хрупкое межкристаллитное разрушение; б – топография излома профиля лопатки на стадии роста усталостной трещины.

Заключение

Выполнены фрактографическое исследование рабочей лопатки ТВД разрушившийся при эксплуатации агрегата ГТК-10-4.

Установлено следующее.

1. Основной причиной разрушения лопатки является образование и развитие усталостной трещины в направлении от выходной кромки пера к входной кромке.

2. Образование очага разрушения произошло в приповерхностном слое металла выходной кромки лопаток по типу растрескивания от действия высоких нагрузок, соответствующих пределу прочности материала. Воздействие высоких нагрузок было кратковременным, так что после образования дефектов их развитие происходило под действием вибрационной нагрузки. Форма очага в виде зоны объемного растрескивания позволяет предполагать, что причиной его образования является сложное напряженное состояние в пере лопатки, возникшее в результате кратковременной перегрузки, возможно термического происхождения.

3. Вероятной причиной образования хрупкой трещины в торце выходной кромки можно считать имевший место факт проведения термических ремонтных работ пера лопатки. Характерным показателем проведения термических ремонтных работ является присутствие застывших капель расплава на поверхности излома в зоне хрупкого разрушения на выходной кромке пера лопатки.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», № АААА-А18-118020690196-3).

Библиографический список

1. Артамонов В. В. Диагностика причин аварийного разрушения рабочих лопаток газовой турбины / В. В. Артамонов, В. П. Артамонов // Дефектоскопия. – 2013. – № 9. – С. 56–61.
2. Cowles B. A. High cycle fatigue in aircraft gas turbines – an industry perspective / B. A. Cowles // International Journal of Fracture. – 1996. – Vol. 80. – P. 147–163.
3. Mokaberi A. Fatigue fracture analysis of gas turbine compressor / A. Mokaberi, R. Derakhshandeh-Haghighi, Y. Abbaszadeh // Engineering Failure Analysis. – 2015. – Vol. 58. – P. 1–7.
4. Failure Analysis of a Compressor Blade of Gas Turbine / Swati Biswas, M. D. Ganeshachar, J. Kumar, V. N. Satish Kumar // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 86. – P. 933–939.

УДК 621.039

Ширманов И.А., Стругов Е.Д., Аладаилах М.В., Ташлыков О.Л., Абиалсаид М.И., Аскин А.

ОЦЕНКА ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ СТЕКОЛ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОКСИДА ГОЛЬМИЯ ОТ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Аннотация. Выполнена оценка радиационно-защитных параметров образцов стекла с различным соотношением оксида гольмия Ho_2O_3 с применением системы библиотек для компьютерного моделирования процессов прохождения элементарных частиц через вещество Geant4 и базы данных NIST XCOM. Представлены результаты расчетов массового коэффициента ослабления и слоя половинного ослабления для исследуемых образцов при энергии гамма-излучения, изменяющейся от 0,122 до 1,408 МэВ.

Ключевые слова: оксид гольмия, радиационная защита, массовый коэффициент ослабления, Geant4.

Abstract. The radiation-protective parameters of glass samples with different ratios of holmium oxide Ho_2O_3 were evaluated using a system of libraries for computer modeling of the processes of passage of elementary particles through the Geant4 substance and the NIST XCOM database. The results of calculations of the mass attenuation coefficient and the half-attenuation layer for the samples under study at the energy of gamma radiation varying from 0,122 to 1,408 MeV are presented.

Keywords: Holmium Oxide, Radiation Shielding, Mass Attenuation Coefficient, Geant4.

Введение

В настоящее время использование атомной энергии и ионизирующих излучений возрастает. Область применения ионизирующих излучений и номенклатура используемых радиоактивных изотопов постоянно расширяются. При этом необходимо руководствоваться основными принципами радиационной безопасности, к которым относятся принципы обоснования, нормирования и оптимизации [1].

Важную роль в снижения облучаемости человека играет экранирование источника ионизирующего излучения. В настоящее время использование экранов ограничено небольшим выбором материалов, часто не обладающих удобством использования, что затрудняет их установку и снятие. Для защиты от рентгеновского и γ-излучения применяют экраны из материалов с большим атомным номером и высокой плотностью (например, железо, свинец, вольфрам). В некоторых случаев для защиты (например, рентгеновских кабинетов) используют барит. Среди традиционных защитных материалов наиболее эффективны свинец и вольфрам. Однако их стоимость весьма значительна. Высокая пластичность требует решения сложных конструкционных задач при креплении листового свинца толщиной более 5 мм в вертикальном положении [2].

Реализация принципа оптимизации в радиологической защите персонала

возможна по многим направлениям [3], в том числе значительный потенциал имеет оптимизация состава радиационно-защитных материалов [4], [5]. Это связано со значительной долей биологической защиты в стоимости объекта использования атомной энергии (радиационно-опасного объекта).

Среди используемых защитных материалов особое место занимают стекла, являющиеся обязательным конструкционным элементом в составе некоторых помещений, где требуется визуальный контроль выполняемых внутри работ. Несмотря на то, что работы по созданию радиационно-защитных стекол велись с начала освоения энергии атома и использования ионизирующих излучений [6], в последние годы интерес к ним возрос. Это связано с поиском новых перспективных составов стекол, оценкой возможности исключения свинца из их состава.

При выборе материала стекол для радиационной защиты с возможностью использования в качестве смотрового окна необходимо учитывать три фактора: окраску самого стекла, окраску вызванную гамма-излучением и устойчивость этой приобретенной окраски при комнатной температуре. В настоящее время разработано несколько различных типов стекол для таких защитных окон, например свинцовые стекла, которые имеют хорошие экранирующие способности.

Целью данной работы является определения характеристик радиационно-защитных стекол типа $85TeO_2$-(15-y)Bi_2O_3-yHo_2O_3, где y = (0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 мол.%) при различном массовом составе оксидов гольмия для защиты от гамма-излучения [7]. Для этого были рассчитаны параметры экранирования излучения, такие как массовый коэффициент ослабления μ_m (MAC – mass attenuation coefficient), линейный коэффициент ослабления μ (LAC – linear attenuation coefficient), слой половинного ослабления $\Delta_{0,5}$ (HVL – half value layer), средняя длина свободного пробега (MFP – mean free path), эффективный атомный номер (Z_{eff} – effective atomic number) в диапазоне энергий 0,122–1,408 МэВ. Исследование параметров экранирования стекла под влиянием гамма-излучения проводилось с использованием базы данных NIST XCOM и имитационного кода Монте-Карло Geant4.

Материалы и методика эксперимента

В данной работе рассматриваются стекла с различным содержанием составных компонентов $85TeO_2$-(15-y)Bi_2O_3-yHo_2O_3, где y = (0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 мол.%) Данные по химическому составу образцов стекол для оценки их радиационно-защитных характеристик взяты из работы [7] и представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Химический состав исследуемых образцов стекол

Химический состав каждого образца (мол.%)				
Образец	Te	Bi	Ho	O
S1	0,45560	0,38584	0	0,15856
S2	0,45585	0,38347	0,00203	0,15865
S3	0,45609	0,38111	0,00407	0,15873
S4	0,45634	0,37874	0,00610	0,15882
S5	0,45659	0,37637	0,00814	0,15891
S6	0,45684	0,37390	0,01018	0,15890

Geant4 – это платформа моделирования процессов прохождения элементарных частиц через вещество на основе кода Монте-Карло. Он используется во многих областях, связанных с использованием ядерной энергии и т. д. [8]. В данной работе Geant4 использовался для моделирования прохождения гамма-лучей через исследуемые образцы стекол: S1, S2, S3, S4, S5 и S6. Для достижения поставленной задачи потребовалось построить точную трехмерную модель (рис. 1). Детектор и гамма-источник были помещены в два отдельных цилиндрических свинцовых экрана, каждый экран имеет отверстие диаметром 3 мм в центре щита. Был создан узкий пучок гамма-лучей для проверки закона Бира-Ламберта, который использовался для расчета коэффициентов массового ослабления. При каждой выбранной энергии моделирование сначала проводилось без образца стекла, расположенного между источником и детектором, чтобы оценить интенсивность падающего фотона (I_0). Затем моделирование было произведено заново со стеклянным материалом, помещенным на путях фотонного пучка, для получения интенсивности ослабленного фотона (I).

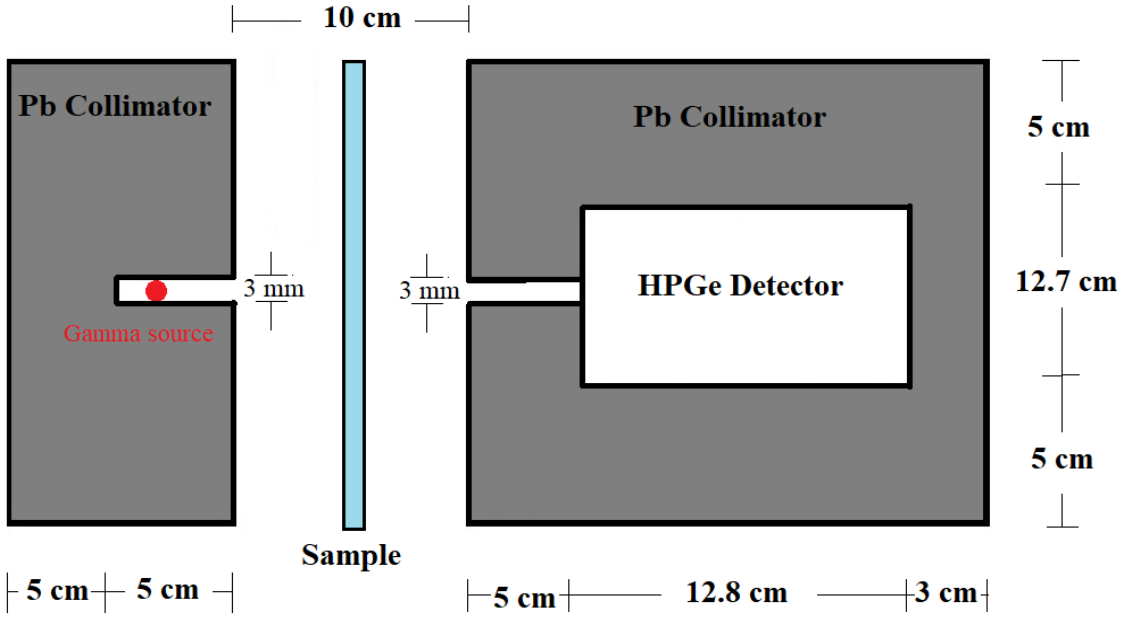


Рисунок 1 – Имитационная геометрия Geant4

Массовый коэффициент ослабления и линейный коэффициент ослабления являются основными параметрами защиты, они используются для оценки способности исследуемых композитов ослаблять падающее гамма-излучение и определяются следующими уравнениями (1) и (2):

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}\sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \quad (1)$$

где $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i$ – массовый коэффициент ослабления i-го составного элемента, w_i – массовая доля i – го составного элемента.

$$\mu = -\frac{1}{x}\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (2)$$

где I_0 – интенсивность радиоактивного источника без экранирующего материала, I – интенсивность радиоактивного источника с экранирующим материалом, x – толщина экранирующего поглотителя (см).

Слой половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$) представляет собой необходимую толщину экранирующего материала для уменьшения интенсивности излучения до половины от его начального значения [9]. Слой половинного ослабления (HVL) и средняя длина свободного пробега (MFP) рассчитываются с использованием линейного коэффициента ослабления, как указано в уравнениях 3, 4 соответственно [10]:

$$HVL = \frac{ln2}{\mu} \quad (3)$$

$$MFP = \frac{1}{\mu} \quad (4)$$

где μ – линейный коэффициент ослабления.

Эффективный атомный номер (Z_{eff}) был вычислен с помощью уравнения (5) следующим образом [11]:

$$Z_{eff} = \frac{\sum_i f_i A_i (\mu_m)_i}{\sum_j \frac{A_j}{Z_j}(\mu_m)_j} \quad (5)$$

где A_i – атомная масса i-го составного элемента, f_i – массовую долю i-го элемента, Z_i – атомный номер i-го элемента, $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i$ – массовый коэффициент ослабления i-го составного элемента образца стекла соответственно.

Аналогично, эффективная электронная плотность вычисляется с помощью уравнения (6), основанного на уравнении (5):

$$N_{eff} = N_a \frac{Z_{eff}}{< A >} \quad (6)$$

где $< A >= \sum_i A_i f_i$ – средняя атомная масса, N_a – число Авогадро.

Результаты и обсуждение

Значения коэффициентов массового ослабления для теллурито-висмутого стекла с добавлением оксидов гольмия $85TeO_2$-(15-y)Bi_2O_3-yHo_2O_3, y=(0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 мол.%) были смоделированы с использованием расчетного кода Geant4. Коэффициенты массового ослабления определены с помощью Geant4 и базы данных NIST XCOM для исследуемых стекол S1-S6 в диапазоне энергий от 0,122 до 1,408 МэВ (рис. 2, *а*). Образец стекла S1 с наибольшим содержанием Bi_2O_3 имеет максимальное значение коэффициента массового ослабления в низкоэнергетической области 0,122 МэВ. Коэффициенты массового ослабления, полученные с помощью Geant4, показали, что по мере уменьшения массовых долей Bi_2O_3 их значения изменяются от 1,699 до 1,665 см^2/г. При энергиях излучения выше 0,122-0,344 МэВ наблюдается резкое снижение значений μ_m из-за проявления комптоновского рассеяния. Смоделированные значения коэффициента массового ослабления всех отобранных образцов стекла становятся постоянными при изменении энергии в пределах от 0,662 до 1,408 МэВ, что может быть связано с доминирующим процессом образования пар [12].

Значения линейных коэффициентов ослабления (μ) для висмут-теллуритового стекла с добавлением оксидов гольмия были рассчитаны на основе смоделированных массовых коэффициентов ослабления с использованием кода Geant4, а также рассчитаны теоретически с использованием имеющейся базы данных NIST XCOM (рис. 2, *б*). Дальнейшее увеличение энергии падающего гамма-излучения приводит к быстрому снижению линейного коэффициента ослабления из-за фотоэлектрического взаимодействия. По результатам исследований наибольшее значение линейного коэффициента ослабления наблюдается в диапазоне энергий от 0,122 до 1,408 МэВ получено для образца S1 (содержание Bi_2O_3 15 масс.%).

Значения эффективного атомного номера (Z_{eff}) были рассчитаны для исследуемых стекол с помощью доступного онлайн-программного обеспечения PHY-X. Полученные значения эффективного атомного номера приведены на (рис. 3, *а*). Более высокие значения эффективного атомного номера при низкой энергии обусловлены фотоэлектрическим взаимодействием, которое преобладает в низкоэнергетической области. Образец стекла S1 имеет наибольшее значение эффективного атомного номера при энергии фотона 0,122 МэВ, это связано с доминирующим фотоэлектрическим взаимодействием в этой области и изменяется как $E^{-3.5}$. Однако образец стекла S6 с содержанием (14.5 моль%) Bi_2O_3 и самое высокое содержание (0.5 моль%) Ho_2O_3 имеет минимальное значение эффективного атомного номера при самой высокой энергии фотона 1,408 МэВ. Резкое уменьшение значений эффективных атомных номеров при увеличении энергии связано с обратной пропорциональностью между комптоновским рассеянием и E^{-1} [13].

Эффективная электронная плотность также рассчитывалась с помощью программного обеспечения PHY-X. Полученные значения представлены на (рис.3, *б*). Согласно (рис. 3, *б*) эффективная электронная плотность показывает то же поведение, что и значения эффективного атомного номера.

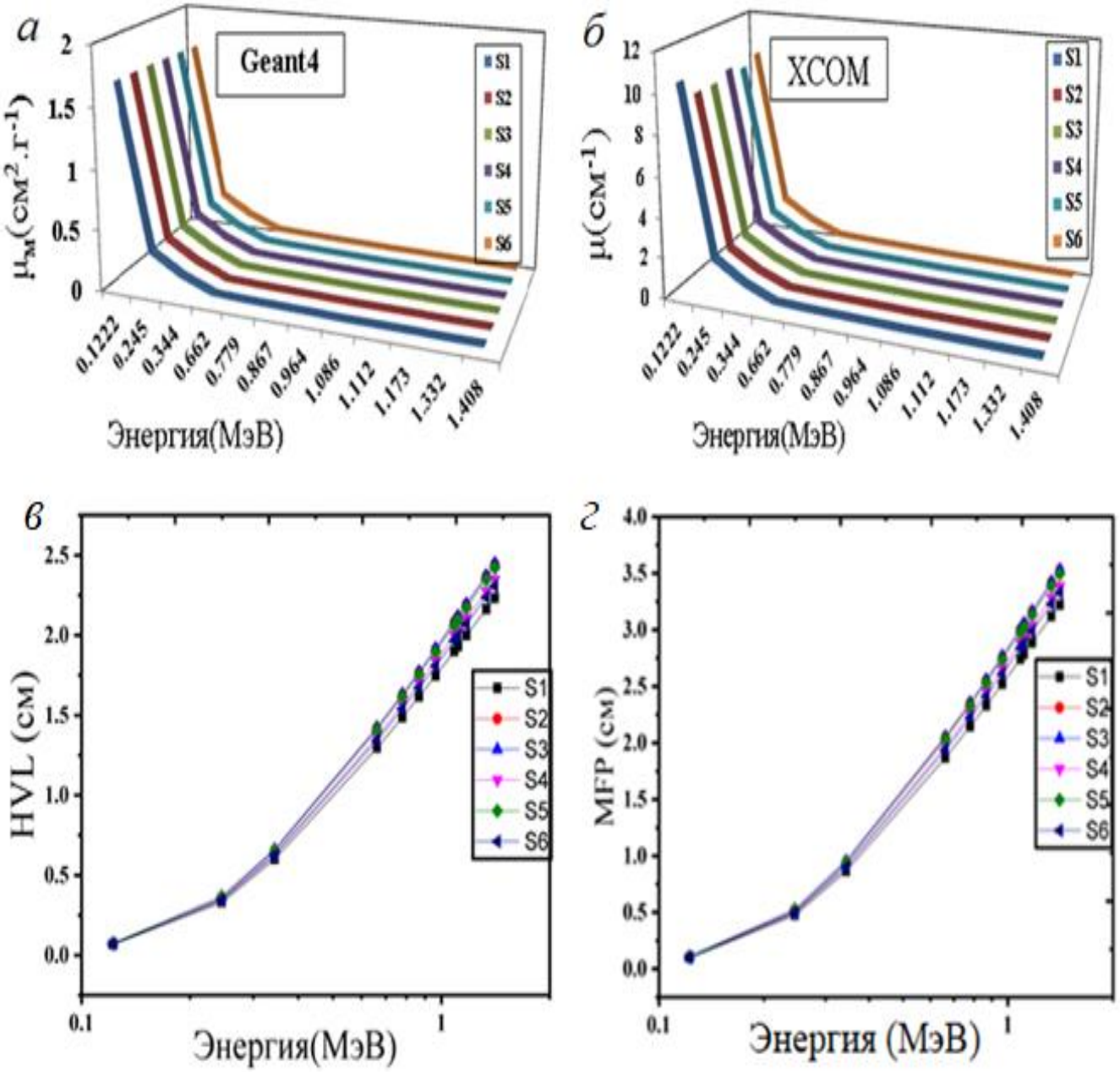


Рисунок 2 – Защитные характеристики образов стекол S1-S6: *а* – массовый коэффициент ослабления; *б* – линейный коэффициент ослабления; *в* – слой половинного ослабления; *г* – средний свободный путь

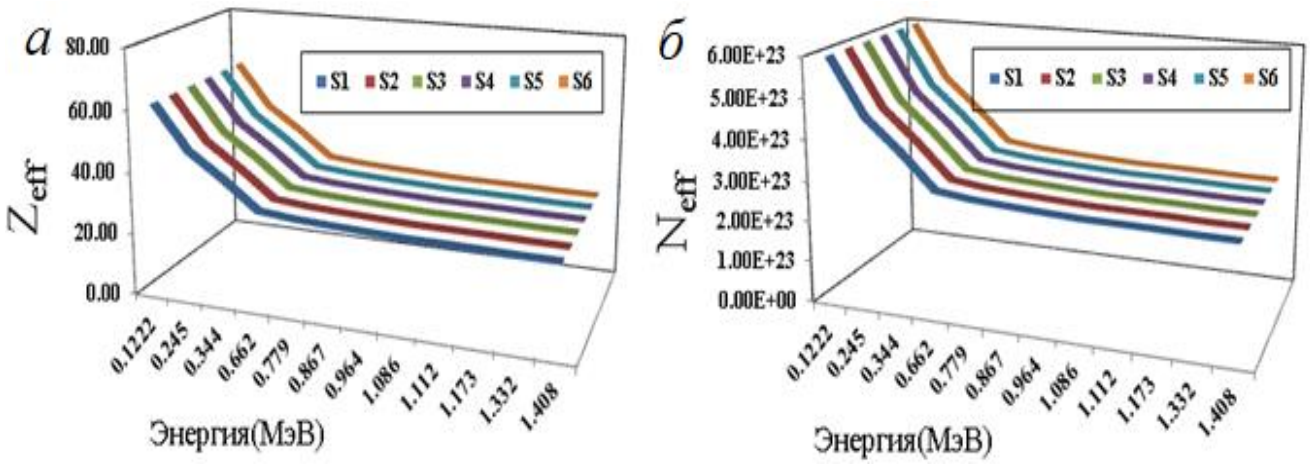


Рисунок 3 – Эффективный атомный номер (*а*) и эффективная электронная плотность (*б*) исследуемых образцов стекол

Важно знать оптимальную толщину стекол, при которой происходит поглощение или уменьшение интенсивности падающих фотонов. В работе были рассчитаны эффективные параметры экранирования, такие как слой половинного ослабления и средняя длина свободного пробега. Оба этих параметра были рассчитаны на основе линейных коэффициентов ослабления и представлены на рис. 2. Слой половинного ослабления является основным параметром, который указывает на необходимую толщину материала для снижения уровня излучения на половину [14]. Из (рис. 2, *в*) видно, что значения слоя половинного ослабления увеличиваются по мере увеличения энергии фотонов. Наименьшее значение слоя половинного ослабления наблюдается в зоне низких энергий до 0,24 МэВ, а резкое увеличение слоя половинного ослабления наблюдается при энергиях от 0,245 до 1,408 МэВ, это связано с обратной пропорциональностью между $\Delta_{0,5}$ и линейным коэффициентом ослабления. На (рис. 2, *г*) показана средняя длина свободного пробега в зависимости от энергии фотона. Полученные данные средней длины свободного пробега имеют небольшие значения в зоне энергии фотонов от 0,122 до 0,344 МэВ для всех образцов стекла. Полученные результаты показывают, что наименьшее значение средней длины свободного пробега имеет образец стекла $85TeO_2$-$15Bi_2O_3$, который имеет наибольшую концентрацию Bi_2O_3.

Таким образом, из всех исследуемых образцов стекол, образец S1 с общей формулой $85TeO_2$-$15Bi_2O_3$ имеет самый высокий коэффициент массового ослабления, самое низкое значение слоя половинного ослабления, а так же значение средней длины свободного пробега. Исходя из полученных данных, следует вывод, что образец стекла S1 обладает наилучшими радиационно-защитными свойствами, по сравнению с другими исследуемыми образцами стекол.

Заключение

С помощью базы данных XCOM и расчетного кода Geant4 в диапазоне энергий от 0,122 до 1,408 МэВ были оценены радиационные защитные свойства теллурито-висмутого стекла с добавлением оксидов гольмия $85TeO_2$-(15-y)Bi_2O_3-yHo_2O_3, y=(0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 мол.%). Рассчитанные параметры радиационной защиты. Массовый коэффициент ослабления и линейный коэффициент ослабления всех исследуемых стекол (S1-S6) уменьшаются по мере увеличения энергии фотонов. Образец стекла S1 с наибольшим содержанием Bi_2O_3 имеет максимальное значение коэффициента массового ослабления на всем диапазоне энергий от 0,122 до 1,408 МэВ и колеблется от 1,699 см^2/г до 0,0511 см^2/г. Аналогично можно сказать и про линейный коэффициент ослабления, который имеет максимальное значение у образца стекла S1.

Слой половинного ослабления и средняя длина свободного пробега увеличивается по мере увеличения энергии фотонов. Наилучшие показатели по данным характеристикам имеет образец стекла S1, значения которого равны 2,197 см для слоя половинного ослабления и 3,170 см для средней длины свободного пробега при энергии 1,408 МэВ.

Результаты показали эффективность добавления Bi_2O_3 при минимальном содержании оксида гольмия. Добавление Bi_2O_3 в состав стекол имеет тенденцию к улучшению экранирующих свойств стекла против гамма-излучения. Среди исследуемых теллурито-висмутовых стекол образец S1 с содержанием Bi_2O_3 (15 мол.%) обладает наилучшими радиационно-защитными свойствами.

Исследование стекол в качестве радиационной защиты является весьма перспективным мероприятием и будет продолжено в дальнейшем.

Библиографический список

1. Новиков Г. А. Обеспечение безопасности в области использования атомной энергии : учебник / Г. А. Новиков, О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 552 с. – ISBN 978-5-7996-2125-4.
2. Оптимизация состава радиационной защиты / О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин, В. Ю. Лукьяненко [и др.] // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2015. – № 4. – С. 36–42.
3. Михайлова А. Ф. Пути реализации принципа оптимизации в радиологической защите персонала / А. Ф. Михайлова, О. Л. Ташлыков // Ядерная физика и инжиниринг. – 2018. – Т. 9, № 4. – С. 393–401.
4. Оптимизация состава гомогенных радиационно-защитных материалов применительно к планируемым условиям облучения / О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин, И. М. Русских [и др.] // Атомная энергия. – 2016. – Т. 121, № 4. – С. 233–236.
5. Экспериментально-теоретическое исследование органометаллических радиационно-защитных материалов, адаптированных к источникам излучения со

сложным изотопным составом / И. М. Русских, Е. Н. Селезнев, О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин // Ядерная физика и инжиниринг. – 2014. – Т. 5, № 5. – С. 449–455.
6. Стефенсон Р. Введение в ядерную технику / Р. Стефенсон. – Москва : Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1956. – 494 с.
7. Optical properties of bismuth tellurite glasses doped with holmium oxide / C. Devaraja, G. V. Jagadeesha, B. Eraiah [et al.] // Ceramics International. – 2021. – Vol. 47, Iss. 6. – P. 7602–7607.
8. GEANT4-a simulation toolkit / S. Agostinelli, J. R. Allison, K. Amako [et al.] // Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2003. – Vol. 506, Iss. 3. – P. 250–303. – URL: https://geant4.web.cern.ch/ (date of access: 05.06.2020).
9. Photon cross-section measurements at low energies in some bromides / A. T. L. Tan, V. Lakshminarayana, I. S. Giles, A. Rajaratnam // Il Nuovo Cimento A. – 1988. – Vol. 99, Iss. 5. – P. 587–594.
10. Машкович В. П. Защита от ионизирующих излучений / В. П. Машкович, А. В. Кудрявцева. – Москва : Энергоатомиздат, 1995. – 495 с.
11. Спайерс В. Эффективный атомный номер и поглощение энергии в тканях / В. Спайерс // Британский журнал радиологии. – 1946. – Vol. 19. – P. 52–63. – URL: https://ru.qaz.wiki/wiki/Effective_atomic_number (date of access: 13.01.2021).
12. Chanthima N. Study of photon interactions and shielding properties of silicate glasses containing Bi_2O_3, BaO and PbO in the energy region of 1 keV to 100 GeV / N. Chanthima, J. Kaewkhao, P. Limsuwan // Annals of Nuclear Energy. – 2012. – Vol. 41. – P. 119–124.
13. The radiation-shielding properties of ternary SiO_2–SnO–SnF_2 glasses: simulation and theoretical study / F. I. El-Agawany, O. L. Tashlykov, K. A. Mahmoud, Y. Rammah // Ceramics International. – 2020. – Vol. 46, Iss. 15. – P. 23369–23378.
14. Calculation of gamma-ray attenuation parameters for locally developed shielding material / R. Biswas, H. Sahadath, A. S. Mollah, Md. F. Hug // Journal of Radiation Research and Applied Sciences. – 2016. – Vol. 9, Iss. 1. – P. 26–34.

УДК 620.186.4

Шлеенков А.С. , Новгородов Д.В. , Коновальчук .В.О.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ ПРОДОЛЬНОГО СВАРНОГО ШВА ТРУБЫ

Аннотация. При производстве прямошовных электросварных швов методом высокочастотной сварки (ВЧС) с помощью рентгеновского контроля были выявлены дефекты продольного сварного шва. Для указанных дефектов проводился металлографический анализ, который показал соответствие требованиям нормативной документации как основного металла, так и сварного соединения. Химический состав и механические свойства также соответствуют требования нормативной документации. Неметаллические включения ликвационных полос листа, выходящие на кромку и попавшие в зону сварки, были выявлены при рентгеновском контроле и не верно идентифицированы, как дефект. Данное предположение основано на совпадении положения «канавок» в зонах сварного соединения с рентгенограммами, при этом дефекты не подтверждаются другими методами контроля и металлографическими исследованиями. Не верная интерпретация дефектов при рентгеновском контроле встречается при производстве труб [1-4] и требует дополнительной проверки или дублирующего контроля.

Ключевые слова: Продольный сварной шов, дефект, металлография, химический анализ, неметаллические включения, микротвердость.

Abstract. During the production of longitudinal electric welds by the method of high-frequency welding (HFW), defects of the longitudinal weld were revealed using X-ray inspection. For these defects, metallographic analysis was carried out, which showed that both the base metal and the welded joint met the requirements of regulatory documents. The chemical composition and mechanical properties also comply with the requirements of regulatory documents. Non-metallic inclusions of the liquation strips of the sheet, emerging on the edge and falling into the welding zone, were detected during X-ray inspection and were not correctly identified as a defect. This assumption is based on the coincidence of the position of the «grooves» in the zones of the welded joint with X-ray diffraction patterns, while the defects are not confirmed by other control methods and metallographic studies. Incorrect interpretation of defects during X-ray inspection occurs in the production of pipes [1-4] and requires additional verification or duplicate inspection.

Keywords: Longitudinal weld, defect, metallography, chemical analysis, non-metallic inclusions, microhardness.

Введение

В статье приведены результаты исследования образцов вырезанных их прямошовных электросварных (ВЧС) труб диаметром 159мм с толщиной стенки 6мм из стали 20 ГОСТ 1050-88 [5], изготовленные по ГОСТ 10705-88 [6]. На продольном сварном шве указанных труб при рентгенографическом контроле предположительно были обнаружены непровары и трещины, при этом сварные соединения прошли необходимые испытания. Стоит отметить, что при магнитной дефектоскопии данных

труб с помощью установки УМД-101М, установленной в технологической линии производства дефекты не были обнаружены.

Целью работы являлось выявление и образмеренивание обнаруженных дефектов, проведение металлографического исследования основного металла и сварного соединения, химический анализ и косвенная оценка прочностных характеристик металла. Доказать эффективность магнитного метода контроля и подтвердить его надежность.

В ходе работы на представленных образцах проводилось исследование состояния наружных и внутренних поверхностей трубы, макро- и микроструктурное состояние сварных соединений и основного металла, химический анализ материала и по значениям микротвердости косвенная оценка их прочностных характеристик.

Образцы для исследований

Для исследования были получены две катушки труб длиной около 200мм, общий вид образцов представлен на рисунке 1. Рентгеновский контроль один из самых распространённых методов неразрушающего контроля сварных соединений. Правильная и достоверная идентификация полученных результатов необходима для образмеривания и оценки возможности дальнейшей эксплуатации [7-10].

а б

Рисунок 1 – Общий вид катушки для исследования.
а – катушка трубы: внешняя поверхность зоны сварного соединения;
б – внутренняя поверхность трубы в зоне сварного шва

Не верная идентификация дефектов, при расшифровке рентгенограмм приводит к перебраковке, что отмечается в работах [1, 9-12]. На рисунке 2

представлено сопоставление положения дефекта на внутренней поверхности катушки трубы и на снимке. На рисунке 1б можно видеть общий вид внутренней поверхности дефектного участка с зачищенной для визуального контроля поверхностью. Видно наличие «канавки» по границе сварного шва, после удаления гарта, а также наличие «пор» и «трещин».

а

б

Рисунок 2 – Сопоставление внутренней поверхности сварного шва с рентгеновским снимком: а – катушка трубы с «канавкой» на внутренней поверхности трубы вдоль продольного шва трубы, совпадает с положением темной полосы на рентгенограмме; б – рентгеновский снимок зоны продольного сварного шва.

Методы исследования

Лабораторные исследования проводились с применением следующих методов:

- визуально – измерительная оценка наружной и внутренней поверхности образцов для сопоставления положения дефектных зон с результатами рентгенографического контроля;
- спектральный анализ для определения химического состава материала труб с применением спектрометра «АРГОН – 5СФ»;

– макро- и микроструктурные металлографические исследования основного металла и зон с обнаруженными дефектами продольного сварного шва. Исследования проводились на механическим способом полированных поперечных сечениях сварного шва. Травление поверхности выполнено 4 %-ый раствором HNO_3. Применялись стереоскопический микроскоп «Цитоваль» и металлографический микроскоп «NEOPHOT-32» (CARLZEISS JENA, увеличение до 500 крат).

Оценка структуры проводилась в соответствии с ГОСТ5640-68[13] и ГОСТ 8233-56[14], размер зерна проводился в соответствии с ГОСТ 5639 – 82 [15]. Оценка загрязненности металла неметаллическими включениями проводилась на нетравленых шлифах образцов по ГОСТ1778-70 [16] (метод Ш) при увеличении х100.

Оценка микротвердости выполнена методом восстановленного отпечатка по ГОСТ 9450-76[17] на металлографических с использованием объектива с индентором «Hanemann» на микроскопе «NEOPHOT-32» при нагрузке 50 кгс.

Визуально-измерительный контроль наружной и внутренней поверхности образцов

С целью определения точного расположения дефектных зон на представленных образцах проводилась визуально-измерительный осмотр наружной и внутренней поверхности образцов труб по сравнению с рентгенограммами.

Визуально и с применением стереоскопического микроскопа «Цитоваль» при увеличении до х100 выполнено обследование всех внешних поверхностей полученных катушек труб. Дефектов типа трещин, непроваров, утяжин, пор и т.д. выходящих за пределы минусового допуска и утоняющих стенку трубы не выявлено. На внутренней поверхности, в зоне продольного сварного шва, присутствуют следы механической зачистки. Зачистка выполнена абразивным инструментом в кольцевом направлении, после проведения рентгенографического контроля. Вдоль границы снятого гарта видна «канавка» с переменной глубиной до 0,3мм. Подобные дефекты могут повлиять на несущую способность трубы [18].

Толщина труб составляет 6мм, в поперечных сечениях образцов, подготовленных для металлографических исследований превышает 300мкм, что не превышает допуска (600мкм) установленного ГОСТ10705-80[6]. «Канавка» расположена с одной стороны шва и ее длина составляет 190мм, то есть практически на всю длину представленного образца. Для выявления внешних границ продольного сварного шва и остаточного гарта применялось травление поперечных шлифов 4 % раствором HNO_3.

В центральной части сечения основного металла присутствует строчечная ликвационная полоса неметаллических включений, которая унаследована от слитка,

используемого при производстве листа.

Определение элементного (химического) состава материала исследуемых образцов труб

Проведенный спектральный анализ, выполненный на эмиссионном спектрометре «АРГОН – 5СФ», показал, что химический состав обоих образцов соответствует стали 20 по ГОСТ 1050-88[5]. Химический состав соответствует данным сертификата на сталь. В таблице 1 приводятся сравнение результатов химического анализа, сертификатов и ГОСТ 1050-88[5].

Таблица 1 – Химический анализ основного металла

Образец	Химические элементы,%										
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	As	Al	Fe
№ 1	0,198	0,22	0,48	0,004	0,005	0,026	0,038	0,044	0,003	0,045	осн
№2	0,174	0,22	0,49	0,005	0,004	0,030	0,033	0,042	0,001	0,041	осн
Серт. №1	0,18	0,22	0,47	0,004	0,005	0,03	-	-	-	-	осн
Серт.№ 2	0,18	0,22	0,47	0,004	0,005	0,03	0,04	0,04	0,002	0,041	осн
ГОСТ 1050-88 сталь 20	0,17-0,24	0,17-0,37	0,00-0,30	0,00-0,04	0,00-0,03	≤0,25	≤0,03	≤0,03	≤0,08	-	осн

Результаты металлографического анализа сварного шва и основного металла.

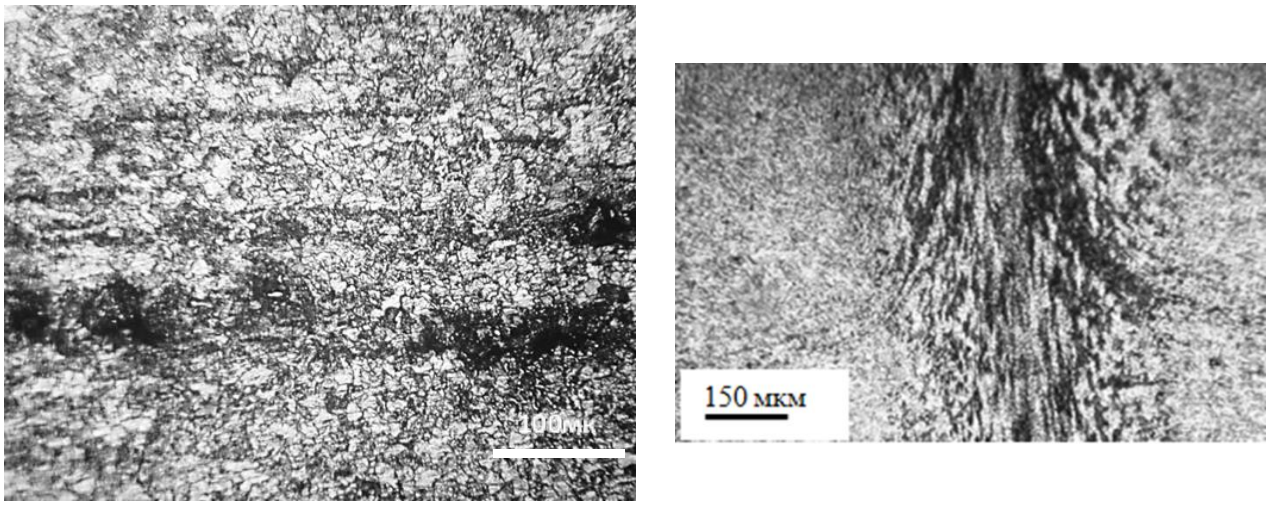
В результате выполненного визуально измерительного контроля и микроскопического осмотра при помощи микроскопа «Цитоваль» (с увеличением до 100 крат) в поперечных сечениях сварного соединения никаких внутренних дефектов сварного соединения не обнаружено.

Результат микроструктурного исследования сварного соединения и основного металла представлен на рисунке 3.

В исследуемых образцах наблюдается не однородная феррито-перлитная структура, характерная для стали 20 в горячекатаном состоянии. Неоднородность выражается в содержании и размере перлитных колоний, до 6 балла по ГОСТ 8233-56[14], а также по состоянию ферритной фазы, у ферритных зерен практически отсутствует направленность. В отдельных зонах можно отметить наличие видманштеттовой структуры. Феррит в зоне продольного сварного шва находится в нормализованном (равновесном) состояниего зерен составляет 8-10 баллов по ГОСТ 5639 – 82[15]. Крупные колонии перлита вытянуты вдоль границ сплавления, что характерно для высокочастотной сварки. Одна из кромок продольного сварного шва имеет сорбитообразную структуру, плохо различаемую при малых увеличениях.

Ликвационные полосы, обогащенные распределениями крупных и мелких неметаллических оксидных включений, характеризуют неоднородность фазового состава металла. Включения очевидно оказывают влияние на качество продольного

сварного шва [19]. В отдельных частях поперечного шлифа можно отметить наличие силикатных включений.



а б

Рисунок 1 – Микроструктура основного металла (сталь 20) исследуемых образцов труб: а – неоднородная горячекатанная феррито-перлитная структура, ликвационные полосы с сегрегациями мелких и крупных неметаллических оксидных включений; б – феррито-перлитная структура стали 20 в сварном шве катушки

Загрязненность основного металла и металла продольного сварного шва достигает 3 баллов и более по ГОСТ1778-70[16]. Локальное загрязнение неметаллическими включениями достигает 5 баллов по ГОСТ1778-70.

Испытание материала на микротвердость

Замеры микротвердости на представленных образцах не выявили различий в результатах оценки прочностных свойств. В зоне сварного соединения микротвердость (HV) находится в диапазоне 220-250 кгс/мм2. Результаты замера микротвердости феррита в основном металле показали значения 170 – 180 кгс/мм2.

Заключение

В статье приведены результаты металлографического исследования основного металла и продольного сварного шва, химического анализа и определения размеров дефектных участков на катушках прямошовных электросварных труб диаметром 159 мм, с целью определения вероятных причин возникновение дефектов в сварном шве, выявленных при рентгенографическом контроле. По результатам проведенных исследований сделаны следующие выводы:

1) При визуальном осмотре и стереоскопическом микроскопическом обследовании внешней поверхности сварного соединения дефектов типа «трещина», «непровар» «раковина» выводящих толщину стенок труб за пределы допуска (более 10%), не выявлено. Дефекты сварного шва, выявленные при рентгеновском контроле, являются «канавками» вдоль границы сварного соединения, и их идентификация как «дефект сварного соединения» является ошибочной. Данное утверждение основывается на совпадении положения «канавки» с ренгенограммой.
2) Металл исследованных труб соответствует ст.20. Химический состав образцов соответствует данным сертификатов на трубы.
3) Макроструктурное состояние зоны сплавления соответствует технологии высокочастотной сварки с отсутствием дефектов.
4) Структура горячекатаной ст.20 феррито-перлитная и неоднородна по содержанию и размеру перлитных колоний. Фазовый состав металла неоднороден, что выражается в наличии ликвационных полос, содержащих включения неметаллических оксидных включений, вытянутых вдоль направления прокатки и частично входящих в металл зоны сплавления. Загрязненность основного металла и металла продольного сварного шва достигает 3 балла по ГОСТ 1778-70. Локальное загрязнение неметаллическими включениями достигает 5 баллов.
5) Замеры микротвердости на представленных образцах не выявили различий в результатах оценки прочностных свойств. В зоне сварного соединения микротвердость (HV) находится в диапазоне 220-250 кгс/мм^2. Результаты замера микротвердости феррита в основном металле показали значения 170 – 180 кгс/мм^2.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», № АААА-А18-118020690196-3).

Библиографический список

1. Кудояров Р. У. Повышение выявляемости дефектов сварных швов труб большого диаметра в условиях заводов-изготовителей / Р. У. Кудояров, А. С. Багин, Л. Ю. Могильнер // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2016. – № 4. – С. 78–83.
2. White B. Non-Destructive Evaluation Utilizing Imaging Plates for Field Radiography Applications / B. White // 19th WCNDT : World Conference on Non-Destructive Testing, 13–17 June 2016. – P. 1–7. – URL://http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/ (date of access: 14.07.2021).

3. Практика радиографического контроля : учеб. пособие / В. К. Кулешов, Ю. И. Сертаков, П. В. Ефимов, В. Ф. Шумихин. – Томск : Изд-во ТПУ, 2011. – 288 с. – ISBN 978-5-98298-859-1.
4. Овчиников В. В. Дефектация сварных швов и контроль качества сварных соединений / В. В. Овчиников. – Москва : Академия, 2017. – 224 с.
5. ГОСТ 1050–88. Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. Общие технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2010. – 29 с.
6. ГОСТ 10705–88. Трубы стальные электросварные. Технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2008. – 8 с.
7. Круглова Г. В. Определение размеров непровара по сечению сварного шва при радиографическом контроле / Г. В. Круглова, Л. В. Князюк, В. С. Кортов // Дефектоскопия. – 2005. – № 4. – С. 63–69.
8. Kruglova G. V. Determination of faulty-fusion dimensions in a cross section of a welded seam by radiographic testing / G. V. Kruglova, L. V. Knyazyuk , V. S. Kortov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2005. – Vol. 41, № 4. – P. 251–257.
9. Круглова Г. В. Определение размеров дефектов сварных соединений по сканированным рентгеновским снимкам / Г. В. Круглова, Л. В. Князюк // Дефектоскопия. – 2004. – № 1. – С. 74–75.
10. Kruglova G. V. Determination of welded joint flaw dimensions on the basis of scanned x-ray images / E. V. Kruglova, L. V. Knyazyuk // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2004. – Vol. 40, Iss. 1. – P. 57–60.
11. Рентгеноскопия дефектов типа стыковой линии в сварном шве, полученном методом сварки трением с перемешиванием / С. В. Тарасов, В. Е. Рубцов, Е. А. Колубаев [и др.] // Дефектоскопия. – 2015. – № 9. – С. 71–75.
12. Radioscopy of remnant joint line in a friction stir welded seam / S. Y. Tarasov, V. E. Rubtsov, E. A. Kolubaev [et al.] // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2015. – Vol. 51, Iss. 9. – P. 573–579.
13. ГОСТ 5640–68. Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры листов и ленты. – Москва : Изд-во стандартов, 2006. – 18 с.
14. ГОСТ 8233–56. Сталь. Эталоны микроструктуры. – Москва : Изд-во стандартов, 2004. – 12 с.
15. ГОСТ 5639–82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. – Москва : Изд-во стандартов, 2003. – 21 с.
16. ГОСТ 1778–70. Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 31 с.
17. ГОСТ 9450–76. Измерение микротвердости вдавливания алмазных наконечников. – Москва : Изд-во стандартов, 1993. – 35 с.
18. Мокроусов В. И. Влияние дефекта внешней фаски продольного сварного шва на прочность стальной трубы / В. И. Мокроусов // Современные тенденции развития науки и технологий. – 2016. – С. 67–74.
19. Захарова И. В. Анализ влияния неметалических включений и микроструктуры на качество сварных соединений стали трубного назначения / И. В. Захарова, В. А. Роянов, С. С. Душенин // Наука та виробництво. – 2018. – Вып. 19. – С. 88–97.

УДК 621.039

Шумков Д.Е., Ташлыков О.Л., Глухов С.М.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ В ШАХТЕ-ХРАНИЛИЩЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ИВВ-2М

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального исследования температурных режимов в различных точках шахты-хранилища облученных топливных сборок при различных режимах охлаждения шахты. Разработано устройство для измерения температуры в точках на различной глубине.

Ключевые слова: шахта-хранилище, термопара, система пассивного отвода тепла, исследовательский ядерный реактор.

Abstract. The paper presents the results of the experimental study of temperature modes in different points of the spent fuel storage tank with various modes of the tank cooling. A device for simultaneous temperature measuring at point at various depth is developed.

Keywords: storage pit, thermocouple, passive removal heat system, research nuclear reactor.

Введение

В целом ядерная безопасность реакторных установок определяется сохранением герметичности оболочек ТВЭЛ как при работе реактора, так и при хранении облученных топливных сборок (ОТВС) в бассейнах выдержки. Для этого должно быть обеспечено их надежное охлаждение, как при нормальной эксплуатации, так и при нарушениях нормальных условий эксплуатации, включая аварии с потерей электроснабжения.

В соответствии с НП-033-11 «Общие положения обеспечения безопасности исследовательских ядерных установок», целью обеспечения безопасности ИЯУ является ограничение радиационного воздействия ИЯУ на работников (персонал), население и окружающую среду, при нормальной эксплуатации и нарушениях нормальной эксплуатации, включая аварии.

Как известно, в результате аварии на АЭС Фукусима-1 были выведены из строя внешние системы электроснабжения и резервные дизельные электростанции АЭС Фукусима-1. Это явилось причиной неработоспособности всех систем штатного и аварийного расхолаживания станции, что привело к повреждению энергоблоков в том числе и ОТВС в бассейнах выдержки.

После аварии на АЭС Фукусима-1 были разработаны дополнительные мероприятия для предотвращения разгерметизации ОТВС в бассейнах выдержки.

В связи с этим поставлена задача исследования эффективности отвода тепла и повышения надежности охлаждения ОТВС в шахте-хранилище с реакторной установкой ИВВ-2М.

Объект исследования

Комплекс с исследовательским ядерным реактором ИВВ-2М предназначен для решения задач в области ядерной физики и физики твердого тела, проведения исследований конструкционных материалов и материалов биологической защиты, наработки радиоактивных изотопов.

Исследовательский реактор ИВВ-2М Института реакторных материалов (г. Заречный) в 1960-1980-е гг. использовался для исследований по радиационному материаловедению, испытания топливных композиций, элементов активных зон ядерных реакторов и других задач. В результате проработки альтернативных путей использования реактора ИВВ-2М в 1990-е годы сформировалось новое направление деятельности, связанное с разработкой технологий производства радиоизотопной продукции для прикладных задач и научных исследований, а также производство и коммерческие поставки радиоизотопной продукции для дефектоскопии, ядерной медицины и фармацевтических исследований. В настоящее время АО «ИРМ» поставляет на мировой рынок ^{192}Ir, ^{14}C,^{131}Cs, ^{177}Lu и продолжает совершенствование действующих и разработку новых программ. В кратко- и среднесрочной перспективе на ИВВ-2М планируется организовать новые производства по наработке изотопной продукции ^{75}Se, ^{90}Y и др.

ИВВ-2М – гетерогенный водо-водяной исследовательский ядерный реактор бассейнового типа с секционированной активной зоной. Реактор работает в номинальном режиме с мощностью 15МВт. ТВС типа ИВВ-2М, топливо – двуокись урана в алюминиевой матрице. Теплоноситель первого контура химобессоленная вода. Теплоноситель второго контура техническая вода, подаваемая из Белоярского водохранилища. [1-2]

После выработки ресурса ОТВС из активной зоны перегружают в шахту-хранилище ОТВС, которая размещена в бетонном массиве реактора и предназначена для выдержки и временного хранения ОТВС. Бак шахты представляет собой корпус прямоугольной формы, внутренние размеры которого составляют 805х1747 мм, высота 5250 мм. Стенки и днище бака выполнены из нержавеющей листовой стали типа 12Х18Н10Т. Толщина стенок 4 мм, толщина днища 10 мм. Шахта хранилище (ШХ) вмещает до 228 ТВС, имеется дополнительный пенал для аварийных и разгерметизированных ОТВС. ТВС в шахте размещают в три яруса.

В состав шахты-хранилища входит система очистки и охлаждения теплоносителя (СООТ) и предназначена для: снятия остаточного энерговыделения с

ОТВС, поддержания требуемого водно-химического режима и температуры теплоносителя в шахте-хранилище (табл. 1).

Таблица 1 – Эксплуатационные пределы и пределы безопасной эксплуатации шахты-хранилища

Наименование параметра рабочей среды	Единицы измерения	Эксплуатационные пределы	Пределы безопасной эксплуатации
		Минимум	Максимум
Максимальная загрузка ОТВС	Штук	-	228
Температура теплоносителя в ШХ	^{0}С	70	90
Ежесуточная убыль теплоносителя	м^3	До 0,028	До 0,056
Понижение уровня теплоносителя	мм	119	200
Удельная активность теплоносителя	Ки/л	До $9{,}99 \cdot 10^{-5}$	До $3 \cdot 10^{-4}$
Температура теплоносителя на выходе из ТО	^{0}С	50	70
Давление технической воды на выходе из ТО	МПа	0,4	0,5

В состав системы очистки и охлаждения теплоносителя шахты-хранилища ОТВС входит следующее оборудование: трубопроводы с запорно-регулирующей арматурой и пробоотборными линиями, теплообменник, насос, группы механических и ионообменных фильтров.

Теплообменник предназначен для охлаждения воды шахты-хранилища и передачи тепла воде, поступающей из системы технического водоснабжения ИЯУ ИВВ-2М [3].

В рамках решения поставленной задачи запланировано проведение работы по исследованию режимов расхолаживания шахты-хранилища в несколько этапов.

На первом этапе с помощью программы Solid Works была разработана твердотельная модель теплообменника, позволяющая анализировать его теплогидравлические характеристики при разных параметрах среды [4-6].

Далее с помощью приложения для анализа гидродинамики и теплообмена FlowSimulation были смоделированы различные режимы распределения температур и скоростей в теплообменнике, в результате которых можно делать выводы об эффективности отвода тепла [7].

На следующем этапе были произведены расчеты остаточных энерговыделений в шахте-хранилище облученных топливных сборок исследовательской ядерной установки ИВВ-2М, с целью определения мощности остаточного тепловыделения в шахте-хранилище для дальнейшего анализа и повышения надежности штатной системы очистки и охлаждения теплоносителя, путем внедрения в шахту-хранилище системы пассивного отвода тепла.

В 2017 году ИЯУ ИВВ-2М была остановлена для проведения модернизации в системе управления и защиты реактора. В течение четырех суток ОТВС в количестве 40 шт. находились в баке остановленного реактора. Затем ОТВС перегрузили в шахту-хранилище, где они находились в течение шести месяцев. За этот период энерговыделение ОТВС снизилось в 28 раз. Во время выдержки были проведены экспериментальные исследования температурных режимов теплоносителя в шахте-хранилище.

При расчете индивидуального энерговыделения ОТВС в качестве исходных данных используются: даты загрузки и выгрузки ТВС, выгорание топлива, время выдержки после прекращения цепной реакции деления, энерговыработка, время работы ТВС в активной зоне, массы делящихся изотопов. На основании этих данных определялись энерговыделение ТВС в баке реактора после останова и в шахте-хранилище. Далее получаем суммарное энерговыделение за время выдержки ТВС в баке реактора и шахте-хранилище. [8-9]

Анализ изменения остаточных энерговыделений в шахте-хранилище ОТВС исследовательской ядерной установки ИВВ-2М показал, что за четверо суток, когда ТВС находились в баке реактора, энерговыделение снизилось на 40 кВт.

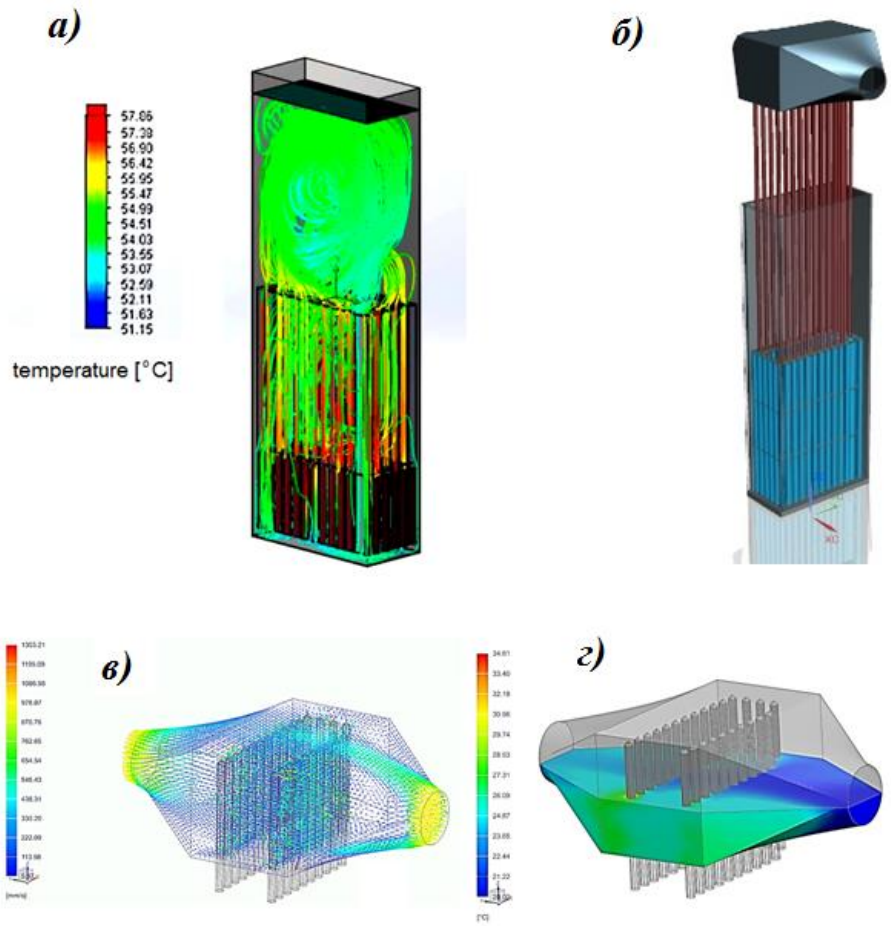
Система очистки и охлаждения теплоносителя является активной, то есть в случае обесточивания ее работа прекращается. При этом следует учитывать, что тепло от ОТВС будет отводиться за счет теплопроводности и рассеяния в строительных конструкциях. Согласно проведенной оценке рассеяния теплоты через окружающие шахту строительные конструкции, мощность отвода теплоты через дно шахты-хранилища составит от 57,7 до 418 Вт, а через стены – от 0,6 до 10 кВт. Некоторое количество теплоты будет отводиться за счет испарения части воды из бака ШХ [10].

В рамках нашего проекта с учетом опыта зарубежных и отечественных конструкторских решений планируется произвести разработку системы пассивного отвода тепла с использованием тепловых труб.

Методы и технологии

Для оценки надежности охлаждения ОТВС в режиме обесточивания, построена трехмерная модель шахты-хранилища и проведено моделирование теплогидравлических процессов в режиме естественной циркуляции при

отключении системы очистки и охлаждения теплоносителя и системы вентиляции (рис. 1,а) [11-12].



а) Моделирование теплогидравлических процессов в режиме естественной циркуляции; б) Упрощенная 3D-модель системы пассивного отвода тепла; в) Распределение скорости по воздушному коллектору; г) Распределение температуры потока по воздушному коллектору

Рисунок 1 – Моделирование шахты-хранилища ОТВС

На следующем этапе в рамках разработки концепта системы пассивного отвода тепла была разработана 3D-модель системы пассивного отвода тепла, состоящая из 25 тепловых трубок диаметром 70 мм, размещенных в стационарном сепараторе шахты-хранилища и воздушного коллектора с естественной циркуляцией воздуха. Рис. 1,б. Воздух из окружающей среды за счет перепада температур движется вверх по трубопроводу, попадает в воздушный коллектор и охлаждает тепловые трубки. После воздушного коллектора воздух выбрасывается в окружающую среду.

Система пассивного отвода тепла на основе тепловых труб или термосифонов является наиболее эффективной и безопасной системой по сравнению с современными теплообменными аппаратами. При разрыве или повреждении одной, или нескольких тепловых трубок исключен выход радиоактивных веществ в

окружающую среду. Так же система пассивного отвода тепла не требует затрат на перекачку теплоносителя, в отличии от теплообменников.

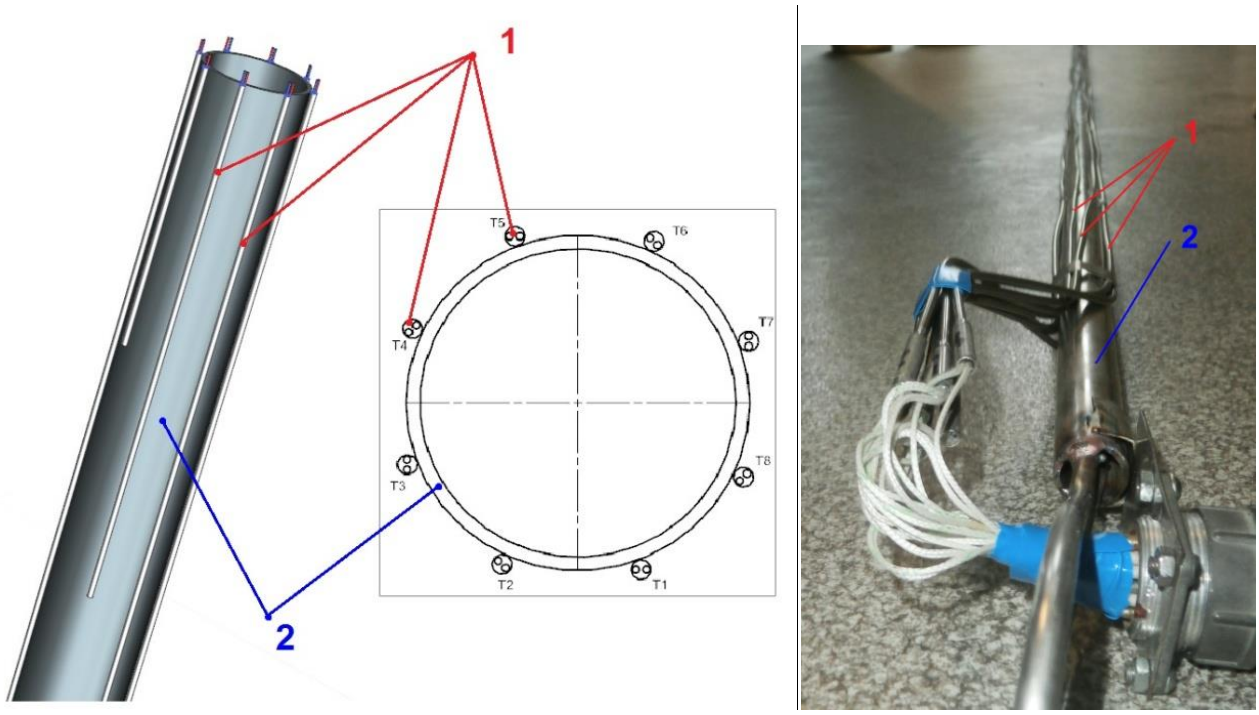
В результате проведенного моделирования в программе Siemens NX были получено распределение скоростей по воздушному коллектору, представленное на рисунке 1в. Данное распределение позволяет анализировать эффективность движения воздуха в воздушном коллекторе и оптимизировать его конфигурацию.

На рисунке 1г представлено распределение температуры потока по воздушному коллектору, что позволяет анализировать эффективность охлаждение тепловых труб.

В рамках подготовки концепта системы пассивного отвода тепла была поставлена задача по исследованию температурных режимов в шахте-хранилище ИЯР ИВВ-2М с целью проведения анализа интенсивности роста температуры при прекращении принудительной циркуляции теплоносителя 1 контура через теплообменник [13].

Результаты и обсуждение

Для проведения экспериментальных исследований была разработана и изготовлена штанга с термопарами с учетом конструкционных особенностей шахты-хранилища ОТВС ИЯР ИВВ-2М. В качестве штанги используется тонкостенная труба диаметром 20 мм и длинной 5 м, на которой с помощью фиксирующего кожуха закреплены восемь термопар с шагом по высоте 625 мм (рис.2).



1 – термопары, 2 – тонкостенная труба

Рисунок 2 – Штанга с термопарами.

Экспериментальные исследования были проведены в период с 23 по 31 марта 2021г. Начальные параметры: температура теплоносителя шахты хранилище +15 ^{0}С, Температура теплоносителя 2 контура (охлаждающая вода) +5 ^{0}С, В шахте-хранилище находилось 179 ТВС с выдержкой от 1 до 4 лет. После прекращении циркуляции теплоносителя 1 контура (химически обессоленная вода) через теплообменник наблюдался рост температуры. Максимальная температура в шахте-хранилище достигла +49 ^{0}С примерно через 7 суток. Рис. 3.

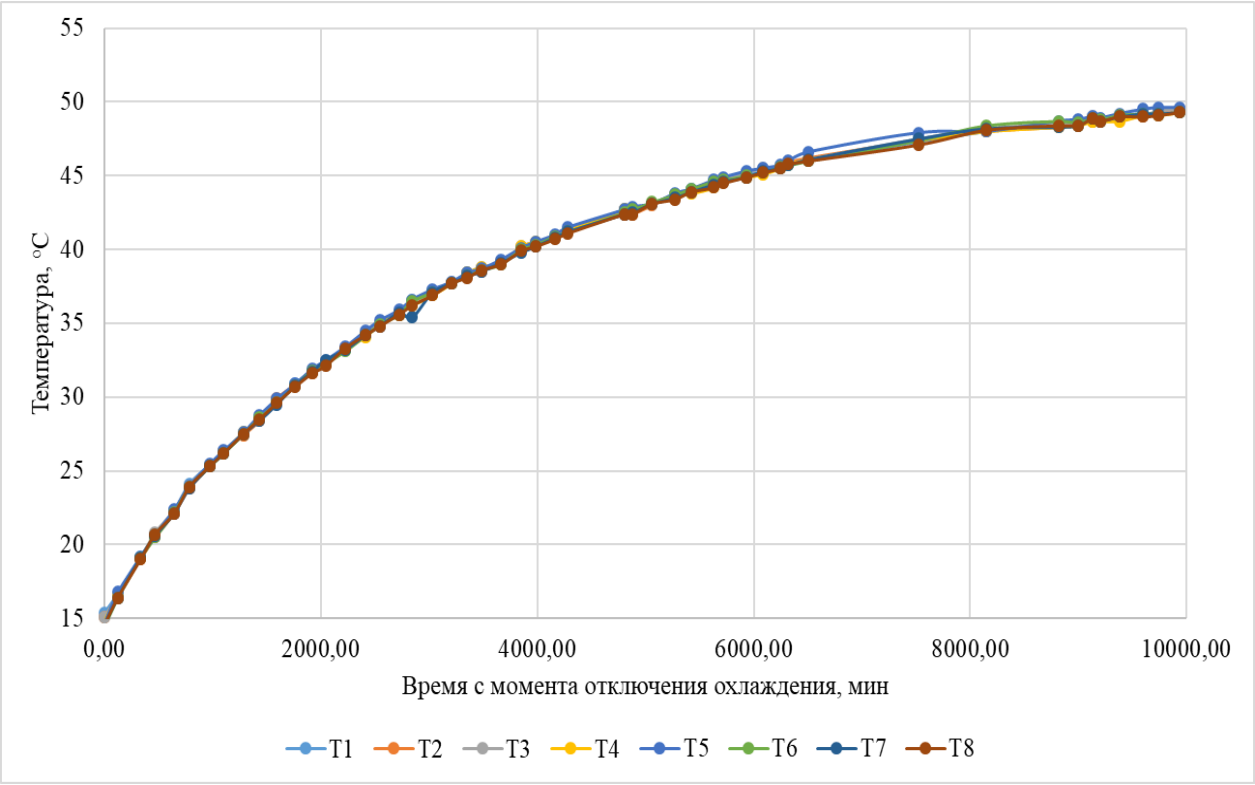


Рисунок 3 –График изменения температуры при отключенной циркуляции теплоносителя.

Экспериментальные исследования проводились в период зимних условий эксплуатации, когда температура теплоносителя 2 контура (охлаждающая вода) близка к минимальной температуре. Планируется проведение экспериментальных исследований изменения температуры воды ШХ в летних условиях эксплуатации, с выгрузкой ОТВС с большим энерговыделением или при выгрузке всех ОТВС из активной зоны ИЯР ИВВ-2М. В таких условиях распределение температуры будет значительно отличаться от приведенных показателей.

Заключение

На основе проведенных экспериментальных исследований в производственных условиях, а также исследований, проведенных в 2019-2020 гг., планируется разработать концепцию по повышению безопасности шахты-

хранилища ОТВС ИЯР ИВВ-2М с использованием системы пассивного отвода тепла на основе тепловых труб (термосифонов). Так же запланирован ряд экспериментальных исследований в условиях летней эксплуатации и с выгрузкой ОТВС с более высокими удельными энерговыделениями и повышенной температурой охлаждающей воды.

Библиографический список

1. Русских И. М. Исследовательский ядерный реактор ИВВ-2М / И. М. Русских // Атомная энергия. – 2016. – Т. 121, вып. 4. – С. 183–187.
2. Русских И. М. Получение радиоактивных изотопов в исследовательском ядерном реакторе для экспериментальных исследований свойств гомогенных радиационно-защитных материалов / И. М. Русских, О. Л. Ташлыков // Труды первой научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института. – Екатеринбург, 2016. – С. 254–257.
3. Numerical simulation of residual heat removal from the spent fuel assemblies storage pit / A. V. Kurteev, V. Klimova, M. Sevastyanov, O. L. Tashlykov // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2174, Iss. 1. – P. 020170.
4. Задача повышения надежности расхолаживания шахты-хранилища отработавших тепловыделяющих сборок / Д. Е. Шумков, В. А. Климова, О. Л. Ташлыков [и др.] // Перспективные энергетические технологии. Экология, экономика, безопасность и подготовка кадров – 2016 : материалы науч.-практ. конф. (Екатеринбург, 11 окт. 2016 г.). – Екатеринбург, 2016. – С. 42–44.
5. Повышение надежности охлаждения облученных топливных сборок ИЯР ИВВ-2М в шахте-хранилище / Д. Е. Шумков, В. А. Климова, О. Л. Ташлыков, Е. Н. Селезнев // Физика. Технологии. Инновации : ФТИ–2017 : тез. докл. IV Междунар. молодеж. науч. конф. (Секции 3, 4, 5) (Екатеринбург, 15–19 мая 2017 г.). – Екатеринбург, 2017. – С. 122–123.
6. Повышение надежности охлаждения облученных топливных сборок ИЯР ИВВ-2М в шахте-хранилище / Д. Е. Шумков, В. А. Климова, О. Л. Ташлыков, Е. Н. Селезнев // Научно-техническая школа-семинар по ядерным технологиям для молодых ученых, специалистов, студентов и аспирантов (Екатеринбург, 10–13 мая 2017 г.). – Екатеринбург, 2017. – С. 28–30.
7. Моделирование теплогидравлических процессов в змеевиковом теплообменнике для определения эффективности теплообмена / Д. Е. Шумков, Д. Н. Литвинов, В. А. Климова, О. Л. Ташлыков // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : материалы Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвящ. памяти проф. Н. И. Данилова (1945–2015) – Даниловских чтений (Екатеринбург, 11–15 дек. 2017 г.). – Екатеринбург, 2017. – С. 990–993.
8. Шумков Д. Е. Повышение надежности охлаждения облученных топливных сборок в шахте-хранилище исследовательского реактора ИВВ-2М / Д. Е. Шумков, С. С. Мингалимов, О. Л. Ташлыков // Инновации в атомной энергетике : сб. докл. конф. молодых специалистов (Москва, 23–24 окт. 2019 г.). – Москва, 2019. – С. 705–711.

9. Оценка надежности охлаждения облученных топливных сборок исследовательского ядерного реактора в шахте-хранилище / Д. Е. Шумков, О. Л. Ташлыков, С. С. Мингалимов, В. А. Климова // Физика. Технологии. Инновации : ФТИ–2019 : тез. докл. VI Междунар. молодеж. науч. конф., посвящ. 70-летию основания Физ.-техн. ин-та (Екатеринбург, 20–24 мая 2019 г.). – Екатеринбург, 2019. – С. 925–926.
10. Расчетная оценка отвода остаточных тепловыделений от шахты-хранилища облученных топливных сборок в строительные конструкции / А. В. Куртеев, С. А. Нейская, М. М. Севастьянов, О. Л. Ташлыков // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика : материалы Междунар. конф. еренции. – Екатеринбург, 2018. – С. 828–833.
11. Исследование надёжности теплоотвода при естественной и принудительной циркуляции в шахте-хранилище исследовательского ядерного реактора ИВВ-2М / Д. Н. Литвинов, М. М. Севастьянов, Д. Е. Шумков [и др.] // V Международная молодежная научная конференция, посвященная памяти Почетного профессора УрФУ В. С. Кортова. Секция 5. Физика. Технологии. Инновации : ФТИ–2018 (Екатеринбург, 14–18 мая 2018 г.) : тез. докл. – Екатеринбург, 2018. – С. 15–16.
12. Исследование эффективности отвода остаточных тепловыделений облученных топливных сборок в шахте-хранилище исследовательского реактора / Д. Н. Литвинов, М. М. Севастьянов, Д. Е. Шумков [и др.] // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : материалы Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвящ. памяти проф. Н. И. Данилова (1945–2015) – Даниловских чтений (Екатеринбург, 11–15 дек. 2017 г.). – Екатеринбург, 2017. – С. 842–845.
13. Shumkov D. E. Development of a passive removal heat system for the storage pit of IVV-2M research nuclear reactor / D. E. Shumkov, O. L. Tashlykov // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2313. – P. 070005.

УДК 621.039

Стругов Е.Д., Ширманов И.А., Аладаилах М.В.,
Ташлыков О.Л., Аль-Буриахи М.С.

ОЦЕНКА ЭКРАНИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СТЕКЛЯННОЙ СИСТЕМЫ Na_2O-B_2O_3-Bi_2O_3-MoO_3 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОДА GEANT4 И БАЗЫ ДАННЫХ XCOM

Аннотация. Представлены результаты оценки экранирующих способностей стёкол по отношению к γ-излучению, содержащих различные соотношения оксида натрия Na_2O, с помощью базы данных XCOM и инструментария для моделирования прохождения элементарных частиц через вещество Geant 4 (с использованием методов Монте-Карло) в диапазоне энергий 0,03-6 МэВ. Массовый коэффициент ослабления и слой половинного ослабления были рассчитаны для определения способности ослабления фотонного излучения в стекле.

Ключевые слова: массовый коэффициент ослабления, слой половинного ослабления, имитационный код Geant 4, метод Монте – Карло

Abstract. The results of the evaluation of the shielding glasses from photon and neutron radiation containing different ratios of sodium oxide Na_2O using the Phy-X software and tools for modeling the passage of elementary particles through matter using the Geant 4 Monte Carlo methods in the energy range of 0.03-6 MeV are presented. The mass attenuation coefficient and the half-attenuation layer were calculated to determine the attenuation ability of photon radiation in glass.

Keywords: mass attenuation coefficient, half value layer, Geant 4 simulation code, Monte Carlo method

Введение

В основе системы радиологической защиты лежат три основных принципа – обоснования, нормирования и оптимизации [1]. Дозовые затраты при проведении радиационно-опасных работ снижают посредством воздействия на радиационный параметр, факторы времени, расстояния. При этом принцип оптимизации может быть реализован несколькими путями [2].

Стоимость защиты современных ядерно-технических установок может достигать 20-30% общей стоимости сооружения [3]. В связи с этим особую актуальность приобретает реализация одного из основных принципов радиационной безопасности – принципа оптимизации – применительно к составу биологической защиты. Возможность реализации принципа оптимизации при проектировании состава радиационно-защитных материалов определяется зависимостью поглощающей способности материалов от энергии γ-квантов, испускаемых изотопами, входящими в состав радиоактивного загрязнения. В свою очередь, изотопный состав зависит от многих факторов (типа реакторной установки, режима эксплуатации и т.п.) [4, 5].

Композитные материалы могут являться эффективным средством для защиты от гамма-излучения и позволяют проектировать оптимальный химический состав применительно к планируемым условиям облучения (для конкретного изотопного состава радиоактивных загрязнений) [6]. При этом большое внимание уделяется стеклам. В настоящее время в мире активно ведутся работы по изучению различных стеклянных систем в качестве защиты от гамма-излучения.

Данная работа направлена на исследование радиационно-защитной способности стекол системы Na_2O-B_2O_3-Bi_2O_3-MoO_3 при различных массовых содержаниях оксида натрия Na_2O и оксида бора B_2O_3 с использованием имитационного кода Geant4 и базы данных NIST XCOM [7]. Для этого были рассчитаны параметры экранирования излучения, такие как массовый коэффициент ослабления μ_m (MAC – mass attenuation coefficient), линейный коэффициент ослабления μ (LAC – linear attenuation coefficient), слой половинного ослабления $\Delta_{0,5}$ (HVT – half value thickness), длина свободного пробега (MFP – mean free path), эффективный атомный номер (Z_{eff} – effective atomic number) в диапазоне энергий 0,03-6 МэВ.

Материалы и методы

Упругие и синтезирующие свойства образцов стекла системы Na_2O-B_2O_3-Bi_2O_3-MoO_3 были изучены Саддиком [8]. Химический состав каждого элемента и плотность стекла приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав исследуемых образцов

Образец	Химический состав каждого элемента (вес%)					Плотность (г/см^3)
	Na	B	Bi	Mo	O	
G0	0,228267	0,215009	0	0	0,556724	2,377
G1	0,188186	0,171785	0,132403	0,030392	0,477234	2,7
G2	0,154928	0,141425	0,230117	0,052822	0,420709	3
G3	0,129373	0,118098	0,305196	0,070056	0,377277	3,2
G4	0,109124	0,099613	0,364689	0,083712	0,342862	3,52
G5	0,092683	0,084605	0,412992	0,0948	0,31492	3,7
G6	0,079469	0,070972	0,455282	0,104507	0,28977	3,93
G7	0,06761	0,061717	0,486659	0,111709	0,272305	4,12
G8	0,057831	0,052791	0,515388	0,118304	0,255686	4,38

Geant4 – это широко используемый в мире инструмент моделирования, который предоставляет пользователю огромный набор различных компонентов для моделирования прохождения различных частиц через различные экранирующие

материалы [9]. Он используется во многих областях, связанных с использованием ядерной энергии, радиоактивных частиц и т. д. [10, 11].

Для достижения поставленной задачи потребовалось построить точную трехмерную установку. Геометрия, используемая для моделирования приведена на рис. 1.

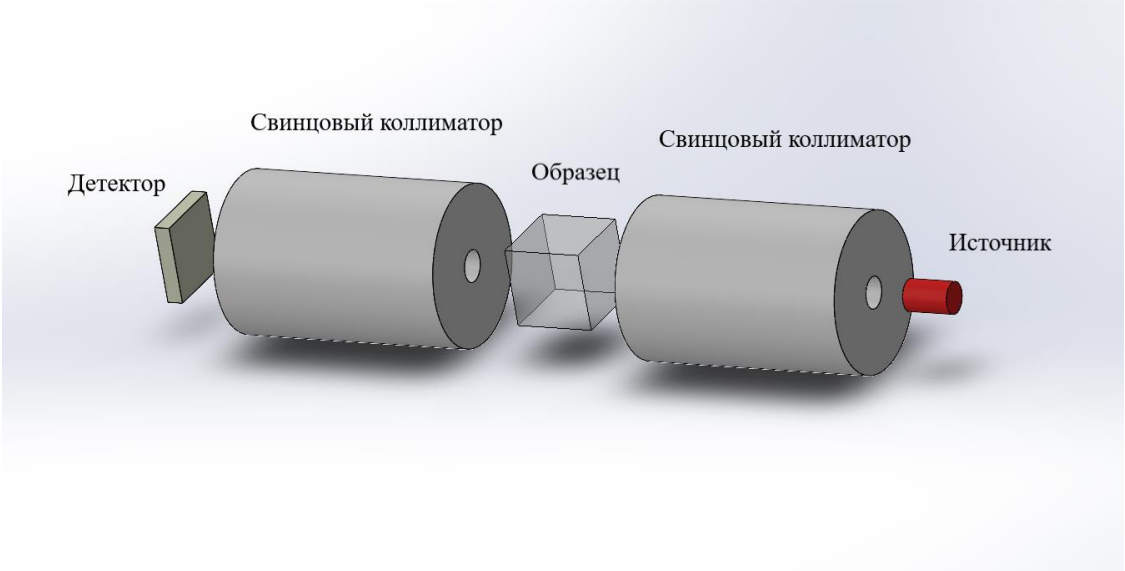


Рисунок 1 – Геометрия, используемая для моделирования

В настоящей работе Geant4 был использован для моделирования свойств экранирования стеклянных образцов (таблица 1) при энергиях фотонов 0,03-6,0 МэВ.

База данных XCOM

База данных, определяет сечения и коэффициенты ослабления для следующих процессов: некогерентное рассеяние, когерентное рассеяние, фотоэлектрическое поглощение и образование пар в поле атомного ядра и в поле электронов для любого элемента или соединений при энергиях от 1 кэВ до 100 ГэВ [12, 13]. Обратные же величины этих коэффициентов ослабления являются средними свободными путями между рассеяниями, фотоэлектрическими взаимодействиями или временем между образованиями пар.

Следует отметить некоторые ограничения. Поперечные сечения элементов в базе данных XCOM относятся к изолированным нейтральным атомам и не учитывают молекулярные и твердотельные эффекты, которые изменяют поперечные сечения, особенно вблизи краев поглощения. Относительно небольшие поперечные сечения, такие как сечения рассеяния Дельбрюка, двухфотонного комптоновского рассеяния или фотомезонного производства, не учитываются.

Теоретические расчеты основных параметров экранирования

Для определения защитных характеристик выбранных стекол необходимо рассчитать параметры радиационной защиты. Массовый коэффициент ослабления (μ_m) и линейный коэффициент ослабления (μ) вычисляются согласно уравнению (1) и (2) и используется для оценки способности исследуемых образцов стекол ослаблять падающее гамма-излучение [14, 15].

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \quad (1)$$

где $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i$ – массовый коэффициент ослабления (МАС) i-го составного элемента, w_i – массовая доля i-го составного элемента.

$$\mu = -\frac{1}{x}\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (2)$$

где I_0 – интенсивность радиоактивного источника без экранирующего материала, I – интенсивность радиоактивного источника с экранирующим материалом, x- толщина экранирующего поглотителя (см) [16].

Слой половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$) представляет собой необходимую толщину экранирующего материала, при которой уменьшается интенсивность излучения до половины от начального значения. Длина свободного пробега (MFP) – это среднее расстояние, которое пролетает частица за время между двумя последовательными столкновениями. Образец с наибольшими показателями слоя половинного ослабления $\Delta_{0,5}$ и MFP является наиболее эффективным против излучени. $\Delta_{0,5}$ и MFP рассчитываются с помощью следующих уравнений:

$$\Delta_{0,5} = \frac{ln2}{\mu}, \quad (3)$$

$$\mathrm{MFP} = \frac{1}{\mu}, \quad (4)$$

где μ – линейный коэффициент ослабления.

Эффективный атомный номер – атомный номер такого условного простого вещества, для которого передача энергии излучения, рассчитанная на один электрон среды, является такой же, и его можно оценить с помощью следующего соотношения (5) [17].

$$Z_{eff} = \frac{\sum_i f_i A_i (\mu_m)_i}{\sum_j \frac{A_j}{Z_j} (\mu_m)_j} \quad (5)$$

где A_i – атомная масса i-го составного элемента, f_i – массовую долю i-го элемента, Z_i – атомный номер i-го элемента, $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i$ – массовый коэффициент ослабления i-го составного элемента образца стекла соответственно.

Аналогично, эффективная электронная плотность вычисляется с помощью уравнения (6), основанного на уравнении (5) [18].

$$N_{eff} = N_a \frac{Z_{eff}}{< A >} \quad (6)$$

где $< A >= \sum_i A_i f_i$ – средняя атомная масса, N_a – число Авогадро.

Результаты и их обсуждение

Для всех образцов стёкол были рассчитаны характеристики экранирования от гамма-излучения в диапазоне энергий от 0,03 до 6,0 МэВ. Значения массового коэффициента ослабления и другие экранирующие свойства были смоделированы имитационным кодом Geant4 и рассчитаны теоретически с использованием базы данных XCOM (см. рис. 2). Из графиков видно, что моделируемые и теоретические значения близки друг к другу.

Значения (μ_m) для всех образцов стекла G0-G8 уменьшаются с увеличением энергии излучения и с увеличением (моль%) доли Bi_2O_3-MoO_3. Массовый коэффициент ослабления (см. рис. 2 *а, б*) достигает своего максимума при низких значениях энергий гамма-фотонов (0,03 МэВ) и варьируются в диапазоне 0,415 и 19,372 (см^2/г) для образцов G0 и G8, соответственно. Дальнейший рост энергии излучения приводит к быстрому снижению массового коэффициента ослабления μ_m из-за фотоэлектрического взаимодействия, у которого поперечное сечение изменяется пропорционально $E^{-3.5}$ [19]. При низких энергиях от 0,05 до 3,00 МэВ значения $\mu_м$ уменьшаются по мере увеличения энергии излучения, что связано с преобладанием взаимодействия комптоновского рассеяния [29][20]. При энергиях падающего гамма-излучения больше 3,0 МэВ значения (μ_m) уменьшаются очень медленно, что связано с преобладанием процесса образования пар [21]. Как видно из рисунка 2 (*а, б*) образец стекла G8 имеет самые высокие значения (μ_m), это связано с тем, что он содержит концентрацию 20 Bi_2O_3-20MoO_3 (моль%).

Также рисунке 2 (*в, г*) показаны значения (μ) для выбранных стекол с энергией падающего гамма-излучения 0,03-6,00 МэВ. Видно, что значения линейного коэффициента ослабления ведут себя так же, как и значения μ_m.

Важно знать оптимальную толщину стекол, которые поглощают и уменьшают интенсивность падающего гамма-излучения. Чтобы это узнать, были рассчитаны значения слоя половинного ослабления $\Delta_{0,5}$ и длины свободного пробега с использованием полученных ранее значений линейного коэффициента ослабления (рис. 3 *а*, *б*). Эти данные являются важными параметрами для оценки защитных свойств материалов от гамма-излучения.

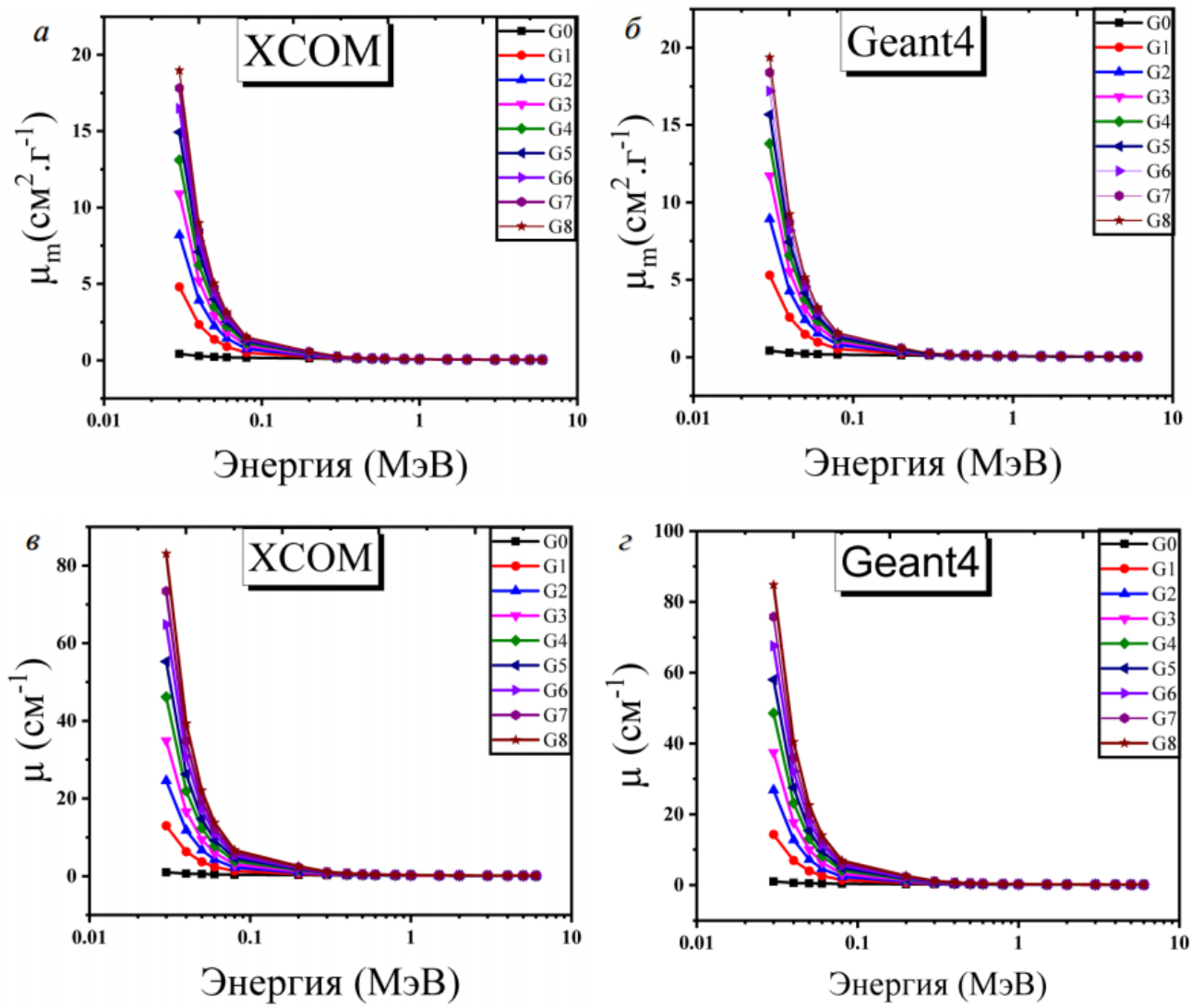


Рисунок 2 – Результаты расчета коэффициентов массового ослабления (μ_m) с помощью XCOM (*а*) и Geant4 (*б*) и линейного коэффициента ослабления (μ) с помощью XCOM (*в*) и Geant4 (*г*);

На рисунке 3 (а, б) видно, что оба значения увеличиваются по мере роста энергии излучения. Самые высокие значения слоя половинного ослабления $\Delta_{0,5}$ получены при 6,0 МэВ и варьировались между 4,394977 (см) и 11,67577 (см), а значения длина свободного пробега, полученные при 6,0 МэВ, варьировались между 6,341958 (см) и 16,84815(см). Результаты показывают, что $\Delta_{0,5}$ и длина свободного пробега являются самыми низкими для образца стекла с самым высоким содержанием Bi_2O_3-MoO_3.

Значения Z_{eff} и N_{eff} с представлены на рисунке 3 (в, г) . Из рисунка 3г видно, что Z_{eff} обладает более высокими значениями при низкой энергии для всех образцов. Такие значения Z_{eff} при низкой энергии обусловлены фотоэлектрическим взаимодействием, которое преобладает в низкоэнергетической области. После этого Z_{eff} резко уменьшается с увеличением энергии гамма-фотона до энергии 2,0 МэВ. Это

резкое уменьшение обусловлено взаимодействием комптоновского рассеяния, которое доминирует в энергетическом поле среды. От 2,0 до 6,0 МэВ значения Z_{eff} начинают увеличиваться, но очень медленно, что связано с образованием пар, а его сечение изменяется с увеличением энергии падающего излучения как log (E), так и Z^2 [22]. Согласно рис. 3г, самые высокие значения Z_{eff} получены около 0,03 МэВ и варьировались между 8,32 и 66,93, в то время как самые низкие значения Z_{eff} получены при 6,0 МэВ и варьировались между 7,65 и 22,01. Высокая вариация значений Z_{eff} между стеклами Na_2O-B_2O_3-Bi_2O_3-MoO_3 обусловлена изменением химического состава. На рис. 3в показаны значения N_{eff} для выбранных стекол с энергией падающего фотона 0,03-6,00 МэВ, из этого рисунка видно, что эффективная электронная плотность (N_{eff}) ведет себя так же, как и эффективный атомный номер (Z_{eff}).

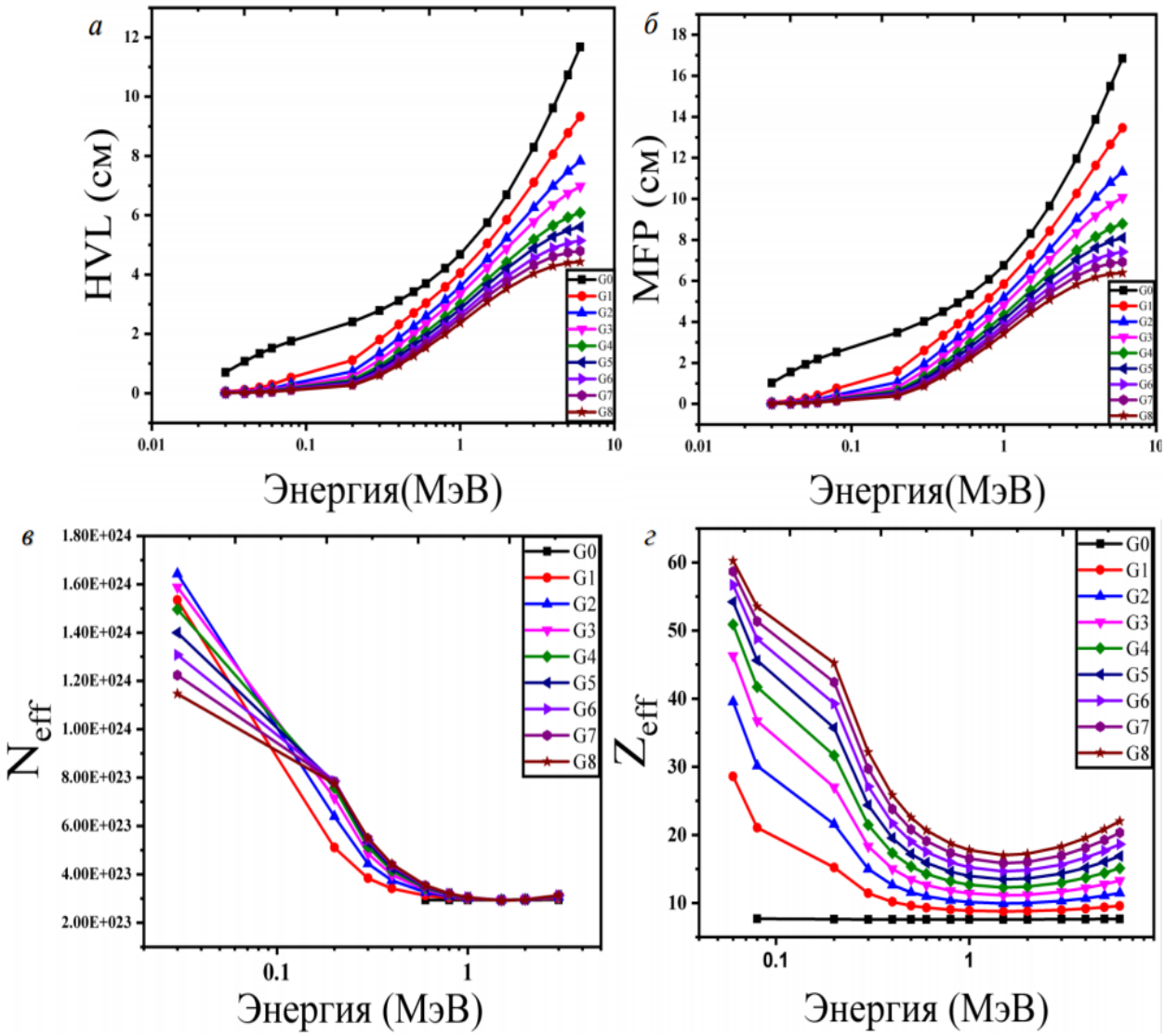


Рисунок 3 – Результаты расчета HVL (а) и MFP (б), эффективного атомного числа (Z_{eff}) (в) и эффективной электронной плотности (N_{eff}) (г)

Заключение

Были рассчитаны экранирующие способности девяти образцов стекол системы Na_2O_3-B_2O_3-Bi_2O_3-MoO_3 с составом компонентов $Na_{2-2x}B_{4-4x}Bi_xMo_{0.5x}O_{7-4x}$ при ($0 \leq x \leq 0{,}4$ моль%). Массовый коэффициент ослабления моделировался с помощью имитационного кода Geant4 в области энергий гамма-излучения от 0,03 до 6,0 МэВ и достигает максимальных значений для образца G8 с содержанием 20 Bi_2O_3-20MoO_3 моль% и колеблется от 0,036 до 19,372 см^2/г и энергия гамма-излучения колеблется от 0,03 до 6,0 МэВ. Также линейный коэффициент ослабления был теоретически рассчитан с помощью программы XCOM и сравнен со значениями, полученными с помощью кода Geant4 для выбранных стекол. Сравнение показало точное соответствие между моделируемыми и расчетными результатами. Кроме того, для стекол Al_2O_3-B_2O_3-Bi_2O_3-MoO_3 были рассчитаны $\Delta_{0,5}$, длина свободного пробега, Z_{eff} и N_{eff}.

Библиографический список

1. Новиков Г. А. Обеспечение безопасности в области использования атомной энергии : учебник / Г. А. Новиков, О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 552 с. – ISBN 978-5-7996-2125-4.
2. Михайлова А. Ф. Пути реализации принципа оптимизации в радиологической защите персонала / А. Ф. Михайлова, О. Л. Ташлыков // Ядерная физика и инжиниринг. – 2018. – Т. 9, № 4. – С. 393–401.
3. Машкович В. П. Защита от ионизирующих излучений / В. П. Машкович, А. В. Кудрявцева. – Москва : Энергоатомиздат, 1995. – 450 с.
4. Оптимизация состава радиационной защиты / О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин, В. Ю. Лукьяненко [и др.] // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2015. – № 4. – С. 36–42.
5. Экспериментально-теоретическое исследование органометаллических радиационно-защитных материалов, адаптированных к источникам излучения со сложным изотопным составом / И. М. Русских, Е. Н. Селезнев, О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин // Ядерная физика и инжиниринг. – 2014. – Т. 5, № 5. – С. 449–455.
6. Оптимизация состава гомогенных радиационно-защитных материалов применительно к планируемым условиям облучения / О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин, И. М. Русских [и др.] // Атомная энергия. – 2016. – Т. 121, № 4. – С. 233–236.
7. ZnO–PbO–B_2O_3 glasses as gamma-ray shielding materials. Nuclear Instruments and Methods / H. Singh, K. Singh, L. Gerward [et al.] // Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2003. – Vol. 207, Iss. 3. – P. 257–262.
8. Saddeek Y. B. Synthesis and several features of the Na_2O-B_2O_3-Bi_2O_3-MoO_3 glasses / Y. B Saddeek, A. M. Abousehly, S. I. Hussien // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2007. – Vol. 40, Iss. 15. – P. 4674.
9. GEANT4-a simulation toolkit / S. Agostinelli, J. R. Allison, K. Amako [et al.] // Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers,

Detectors and Associated Equipment. – 2003. – Vol. 506, Iss. 3. – P. 250–303. – URL: https://geant4.web.cern.ch/ (date of access: 06/03/2021).
10. GEANT4 hadronic physics for space radiation environment / A. V. Ivantchenko, V. N. Ivanchenko, J. M. Q. Molina, S. Incerti // International journal of radiation biology. – 2012. – Vol. 88, Iss. 1/2. – P. 171–175.
11. Paganini M. CaloGAN: Simulating 3D high energy particle showers in multilayer electromagnetic calorimeters with generative adversarial networks / M. Paganini, L.de Oliveira, B. Nachman // Physical Review D. – 2018. – Vol. 97, Iss. 1. – P. 014021.
12. Berger M. J. XCOM: Photon cross sections database personal computer. Web Version 1.2 on a personal computer : NBSIR-87-3597 / M. J. Berger, J. H. Hubbell. – 1987. – URL: http://physics.nist.gov/xcm (date of access: 30.08.2021).
13. Shielding features of concrete types containing sepiolite mineral: comprehensive study on experimental, XCOM and MCNPX results / M. I. Sayyed, H. O. Tekin, O. Killcoglu [et al.] // Results in Physics. – 2018. – Vol. 11. – P. 40–45.
14. Akyildirim H. Radiation shielding features of zirconolite silicate glasses using XCOM and FLUKA simulation code / H. Akyildirim, E. Kavaz, F. I. El-Agawany [et al.] // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2020. – Vol. 545. – P. 120245.
15. Assessment of gamma-rays and fast neutron beam attenuation features of Er_2O_3-doped B_2O_3–ZnO–Bi_2O_3 glasses using XCOM and simulation codes (MCNP5 and Geant4) / G. Lakshminarayana, M. G. Dong, A. Kumar [et al.] // Applied Physics A. – 2019. – Vol. 125, Iss. 11. – P. 1–14.
16. Xingcai L. Effectively predict the solar radiation transmittance of dusty photovoltaic panels through Lambert-Beer law / L. Xingcai, N. Kun // Renewable energy. – 2018. – Vol. 123. – P. 634–638.
17. Radiation shielding parameters of BaO–Nb_2O_5–P_2O_5 glass system using $MCNP_5$ code and XCOM software / M. I. Sayyed, Z. Y. Khattari, A. Kumar [et al.] // Materials Research Express. –2018. – Vol. 5, Iss. 11. – P. 115203.
18. Exploration of gamma radiation shielding features for titanate bismuth borotellurite glasses using relevant software program and Monte Carlo simulation code / G. Lakshminarayana, A. Kumar, M. Dong [et al.] // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2018. – Vol. 481. – P. 65–73.
19. Issa S. A. Effective atomic number and mass attenuation coefficient of PbO–BaO–B_2O_3 glass system / S. A. Issa // Radiation Physics and Chemistry. – 2016. – Vol. 120. – P. 33–37.
20. Comparative studies of different concretes on the basis of some photon interaction parameters / U. Kaur, J. K. Sharma, P. S. Singh, T. Singh // Applied Radiation and Isotopes. – 2012. – Vol. 70, Iss. 1. – P. 233–240.
21. Investigations of radiation shielding using Monte Carlo method and elastic properties of PbO-SiO_2-B_2O_3-Na_2O glasses / S. A. Issa, Y. B. Saddeek, H. O. Tekin [et al.] // Current Applied Physics. – 2018. – Vol. 18, Iss. 6. – P. 717–727.
22. Effective atomic numbers for some calcium-strontium-borate glasses / R. Sharma, J. Sharma, T. Singh // Annals of Nuclear Energy. – 2012. – Vol. 45. – P. 144–149.

УДК 631.35:004.896

Ступин С.А., Огородникова О.М.

ПРОЕКТ БИОНИЧЕСКОГО ЗАХВАТНОГО УСТРОЙСТВА РОБОТА ДЛЯ СБОРА УРОЖАЯ

Аннотация. В данной статье принципы бионического дизайна были применены при проектировании захватного устройства для робота по сбору фруктов. Данные эскизного проектирования были использованы при моделировании захватного устройства и расчете его прочности в программном пакете ANSYS. Прочностные расчеты были выполнены в сочетании с топологической оптимизацией геометрии с целью уменьшения веса конструкции. Оптимизированная геометрия деталей была доработана с помощью специализированных программ трехмерного моделирования. Результатом работы является действующий прототип захватного устройства, ответственные детали которого были изготовлены из пластика на 3D-принтере. Принципы бионического дизайна и организации жизнедеятельности организмов были использованы также при проектировании системы движения и системы управления, включая подсистему обнаружения объектов.

Ключевые слова: бионический дизайн, компьютерный инжиниринг, прочностные расчеты, топологическая оптимизация, захватное устройство, сельскохозяйственная робототехника, аддитивные технологии, равнопрочные конструкции.

Abstract. In this article, the principles of bionic design have been applied to the design of a gripper for a fruit harvesting robot. The preliminary design data was used to simulate the gripper and calculate its strength in the ANSYS software package. Strength calculations were carried out in conjunction with topological optimization of the geometry to reduce the weight of the structure. The optimized part geometry has been refined using 3D modeling application. The research resulted in a working prototype of the gripper, the critical parts of which are made of plastic on a 3D printer. The principles of bionic design and behavior of living structures have also been used in the design of motion and control systems for the gripper, including the object detection subsystem.

Keywords: bionic design, computer-aided engineering, strength calculations, topological optimization, gripper, agricultural robotics, additive technologies, equal strength structures.

Введение

Биологические структуры в результате итерационного эволюционного процесса оказались адаптированными к выполнению несущих функций и эффективному сопротивлению внешним силовым нагрузкам. В частности, биологическим материалам и структурам, обеспечивающим конструкционную прочность, свойственны высокие показатели прочности, жесткости и эластичности при малой массе. Подобное сочетание полезных свойств обеспечивается рядом особенностей биологических тканей. Среди них был выделен ячеистый пористый характер ряда естественных структур, таких как пчелиные соты [1]. Также можно отметить градиентное распределение вещества в биологических соединительных

тканях, например, это характерно для волокон целлюлозы в стеблях бамбука и тканей костей животных [2]. Можно обобщить подобные особенности, выделив в качестве их результата формирование равнопрочных структур.

Применение рассмотренных принципов построения живых структур при конструировании механизмов позволяет получать изделия с улучшенными механическими характеристиками. Возможность реализовать подобные нелинейные конструкторские решения на практике была открыта с развитием аддитивных технологий и компьютерного инженерного анализа [3]. Так, совместное применение прочностного расчета и топологической оптимизации на конечно-элементной сетке в CAE-системе позволяет выделить локальные объемы, которые не участвуют в обеспечении прочности, и сформировать равнопрочную конструкцию [4].

Основой концепции автоматизированной топологической оптимизации является совмещение градиентных оптимизационных методик [5, с. 105-109] с применяемым в CAE-системах для абстракции и анализа тел методом конечных элементов (МКЭ) [5 с. 95-101].

На основе этого принципа были развиты такие методы, как эволюционная оптимизация конструкций (Evolutionary Structural Optimization – ESO), заключающаяся в итерационном удалении конечного количества материала и развитая в виде метода двунаправленной эволюционной оптимизации конструкций (Bi-directional Evolutionary Structural Optimization – BESO), которая позволяет одновременно добавлять и удалять материал в области проектирования. Также получил распространение SIMP-метод (Solid Isotropic Material with Penalization), основанный на перераспределении материала твердого тела за счет введения параметра переменной плотности в расчетной области проектирования. Другим направлением развития топологической оптимизации является метод Level-Set (установления уровня или множества уровней), заключающийся в представлении твердого тела совокупностью кривых и поверхностей, заданных в неявном виде. Наконец, существуют комбинированные методы, такие как ESO-SIMP-метод [6].

Применение легких равнопрочных деталей востребовано в робототехнике. Робототехнические системы, как правило, отличаются высокой функциональностью и гибкостью [7]. Это достигается применением многозвенных механизмов, у которых приводы последовательно располагаются на подвижных звеньях. В связи с этим, применение деталей с рациональным распределением материала позволяет не только экономить сырье и сокращать общую массу робота, но и уменьшать моменты инерции звеньев, снижая требования к прочности опорных элементов и мощности приводов [8]. Принципы бионического дизайна также могут облегчить задачу конструирования захватных устройств роботов для деликатной фиксации маложестких объектов, что представляет особый интерес для сельского хозяйства [9]. В данной работе элементы

бионического дизайна были применены при проектировании захватного устройства сельскохозяйственного робота.

Общие проектные решения

В природе можно найти различные ориентиры для проектирования захватных устройств. К примеру, это может быть такой относительно простой орган, как жвала муравья. Жвала насекомых являются парными органами, основной функцией которых является измельчение пищи. У социальных видов, таких как муравьи, они служат еще и для удержания и перемещения объектов. Прототипом для захватных устройств становится и такой сложный биологический объект, как кисть гориллы и других человекообразных приматов. Подобные антропоморфные устройства отличаются сложностью применяемых кинематических схем.

Следует также упомянуть так называемую мягкую робототехнику. Разработчики в данной области черпают вдохновение, в частности, в анализе работы хобота слона. Полученные по такому подходу захватные устройства обладают большим числом степеней свободы и требуют сложной системы управления. При выполнении представленной работы в качестве оптимального природного прототипа для захватного устройства сельскохозяйственного робота исходя из поставленных задач была выбрана птичья лапа.

Основу птичьих лап составляют кости, которые удерживаются связками и приводятся в движение сухожилиями. При сокращении мышц, сухожилия перемещаются в канавках костей и сжимают пальцы. На сухожилиях и их оболочках располагаются тонкие гребешки, которые при сжатии лапы сцепляются вместе и фиксируют положение пальцев. Захватное движение лапы достигается сведением заднего и внутреннего когтей, еще два служат для лучшей фиксации объекта. По аналогии действия птичьей лапы при фиксации объектов была разработана кинематическая схема трехпальцевого захватного устройства. Для передачи движения от двигателя была выбрана передача винт-гайка. Среди преимуществ данной передачи помимо простоты и компактности можно выделить свойство самоторможения, подобное сухожилиям птичьих лап.

При проектировании захватного устройства принципы бионического дизайна и организации жизнедеятельности организмов были использованы также в ряде концептуальных решений. Контактирующие с объектами элементы устройства решено обтянуть эластичным материалом, который будет способствовать надежному удержанию плодов без их повреждений, а также изолирует датчики контакта и их выводы от влаги. В этом решении проявляется аналогия с кожей животных. Идеи бионического дизайна также нашли отражение при разработке системы управления, включая подсистему обнаружения объектов [10].

Реализованное проектное решение

С учетом проведенного ранее анализа возможных исполнений захватных устройств и существующих аналогов было принято решение выбрать для проектирования трехпальцевую схему устройства. Выбор трехпальцевого захвата обусловлен требованием центрирования круглого биологического объекта при фиксации и возможным различием в размерах и форме захватываемых объектов. Три расположенные с радиальной симметрией опорные поверхности позволят осуществить надежное удержание объектов даже при их значительном отклонении от идеальной сферической формы и неровности поверхности. Также данная схема устройства обеспечит лучшее центрирование предметов при фиксации в сравнении с двухпальцевым захватом.

В качестве движущего элемента привода выбран мотор-редуктор постоянного тока. Данное решение обеспечит компактность привода и возможность его размещения непосредственно на захватном устройстве. Также не будет снижена общая мобильность робота-манипулятора, поскольку вместо напорных станций, необходимых для пневмо- и гидроприводов, и подключения к стационарной сети, необходимой для двигателей переменного тока, в качестве питающего элемента будет использоваться малогабаритный источник постоянного тока.

Для преобразования вращательного движения вала мотор-редуктора в поступательное движение ползуна захватного устройства выбрана винтовая передача. Достоинствами передач винт-гайка являются компактность, возможность обеспечения определенной степени редукции, технологичность и относительная простота конструкций. Компактность привода в поперечном направлении при этом обеспечивается совмещением осей вала мотора и ходового винта. Компактность передачи в осевом направлении достигается тем, что ее габаритные размеры не изменяются при работе: передача движения осуществляется за счет перемещения гайки вдоль винта. Еще одним важным достоинством винтовых передач является самоторможение, что обеспечивает надежную фиксацию положения захвата без необходимости постоянной подачи напряжения на мотор или специальных конструктивных элементов.

Главным недостатком передач винт-гайка является низкий КПД, обусловленный силами трения в резьбе. При этом выделяют передачи с трением качения или шарико-винтовые передачи, для которых характерен относительно высокий КПД. Однако их также выделяет существенно более высокая сложность изготовления и ремонта, поэтому для разрабатываемого устройства была принята винтовая передача скольжения.

Захватное устройство включает в себя пять основных механических узлов: основание, толкатель и три пальца. Блок управления выполнен в виде отдельного конструктивного элемента, соединенного с механической подсистемой только

электрическими связями.

Основание выполнено аналогично конструкции ротора асинхронного электродвигателя: в виде стержней, соединенных дисками с торцов и в середине. Данная форма позволяет достичь достаточной жесткости при малой массе. Помимо этого открытость конструкции основания облегчает сборку захватного устройства и проведение электрических соединений. Нижний диск основания также выполняет функцию присоединительного фланца для крепления к руке робота, для чего в нем предусмотрены специальные отверстия. Средний диск помимо обеспечения жесткости служит для размещения мотор-редуктора, и на нем также предусмотрены соответствующие конструктивные элементы. Верхний диск и сопряженные с ним детали основания выполняют функцию направляющих толкателя. Кроме того к ним на шарнирных опорах присоединены кривошипы пальцев устройства.

Толкатель захватного устройства выполняет функцию ползунов пальцев механизма. Данный узел помимо собственно толкателя включает в себя жестко и соосно соединенную с ним гайку винтовой передачи, винт, муфту и электродвигатель. Все элементы расположены внутри основания и не выходят за продольный габарит основания. На поступательно движущихся деталях узла предусмотрены конструктивные элементы, обеспечивающие индикацию выбора запаса хода толкателя. Верхняя часть толкателя шарнирно соединена с шатунами пальцев захвата.

Каждый палец устройства состоит из шарнирно соединенных кривошипа и шатуна. Шатун при работе захвата совершает плоскопараллельное движение. В геометрии принята изогнутая, когтеобразная геометрия шатунов, которая обтянута эластичным материалом. Это решение обеспечивает надежное и деликатное удержание объектов. Геометрия деталей также будет предусматривает конструктивные элементы для размещения компонентов системы управления и электрических соединений.

Программное моделирование и прочностные расчеты

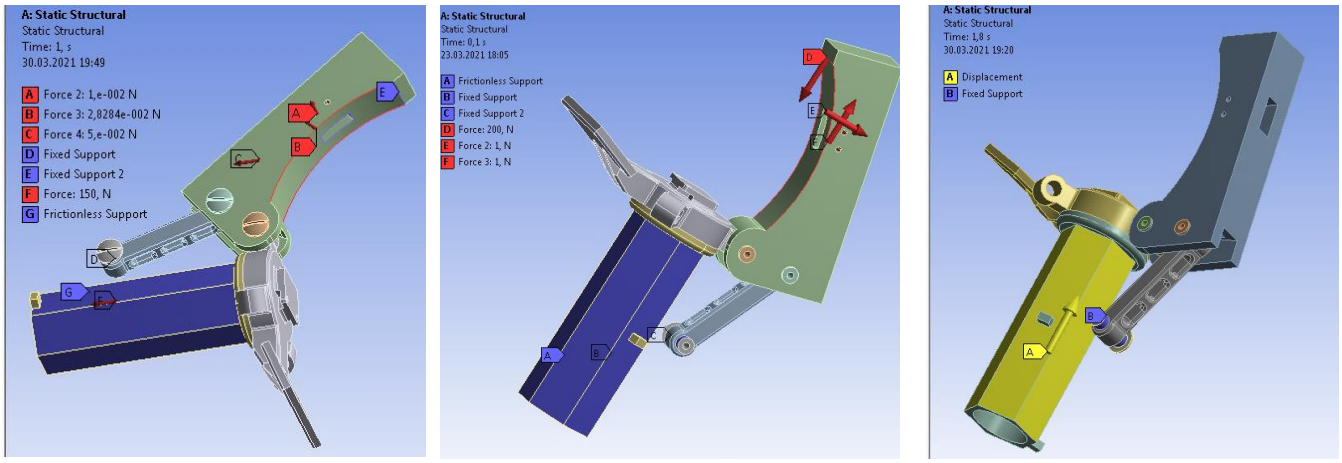
По итогам предварительных расчетов наиболее нагруженными элементами устройства оказались шатуны пальцев, аналогичные по функции когтям птичьих лап. Дальнейшие операции по программному моделированию проиллюстрированы на их примере.

На основании принятых и рассчитанных геометрических параметров была разработана предварительная модель шатуна захватного устройства в CAD-системе Компас-3D. В исходной 3D-модели были детально проработаны лишь внешние очертания и поверхности контакта с другими деталями в сборке. Основной объем был получен сплошным выдавливанием. После этого часть сборки устройства, включающая толкатель и один палец, была сохранена в формате *.sat и импортирована в программный пакет ANSYS.

В качестве материала деталей был принят АБС-пластик. Значения его

характеристик были введены в данные материалов ANSYS Workbench.

На основании предварительных расчетов в программной среде ANSYS Workbench были сформированы схемы нагружения модели. При проведении прочностных и оптимизационных расчетов был принят суперпозиционный подход, заключающийся в раздельной оценке влияний различных факторов и дальнейшем совмещении результатов расчетов. В соответствии с этим были выделены следующие анализируемые ситуации: максимальная статическая нагрузка при фиксации объекта (Рис. 1 (а)), удар шатуна при врезании в препятствие на допустимой скорости (Рис. 1 (б)), динамическая нагрузка при раскрытии схвата (Рис. 1 (в)).



(а) (б) (в)

Рисунок 1 – Схемы нагружения в программной среде Ansys Workbench для анализа статической прочности (а), удара (б) и динамической прочности (в)

Далее был выполнен анализ прочности, в ходе которого рассчитывался коэффициент запаса прочности (k). По итогам моделирования были получены значения: k = 1.5028 для схемы фиксации объекта, k = 1.6583 для схемы удара, k = 3.9156 для схемы раскрытия. Следовательно, исходная конструкция обладает допустимым запасом прочности и может быть оптимизирована.

Топологическая оптимизация и изготовление деталей

Топологическая оптимизация модели шатуна была проведена в пакете ANSYS в общих проектах для каждой схемы нагружения, представленной на рис. 1. Результаты прочностных расчетов были использованы в качестве исходной информации для оптимизации, и была решена задача по уменьшению массы модели. Целевая функция процедуры оптимизации – уменьшение массы на 70%. В соответствии с поставленной расчетной задачей, все наименее нагруженные конечные элементы модели должны были быть удалены из сетки. Величина остаточной массы была занижена в связи с тем, что в дальнейшем предполагается

объединить полученные модели для получения детали, способной выдерживать различные типы нагрузок.

Для получения корректных результатов размер конечных элементов в сетке для шатуна был задан равным 1 мм, а для других частей захвата – равным 1,5 мм. Оптимизированная таким образом с сокращением массы до 30% геометрия модели для каждого отдельного случая нагружения показана на рис. 2 (а – в). Окончательная модель оптимизированного шатуна захватного устройства, сформированная из трех представленных в модуле CAD ANSYS SpaceClaim результатов расчетов, показана на рис. 2 (г).

Каждый отдельный вариант оптимизирующих расчетов приводит к значительному удалению материала, так что оставшаяся геометрия не отвечает требованиям назначения детали. Такие результаты были получены потому, что в рассматриваемых схемах задавались различные нагрузки и ограничения, соответствующие конкретному случаю. Однако, сочетая получившиеся модели, можно получить окончательную геометрию, которая в равной степени соответствует всем случаям нагружения.

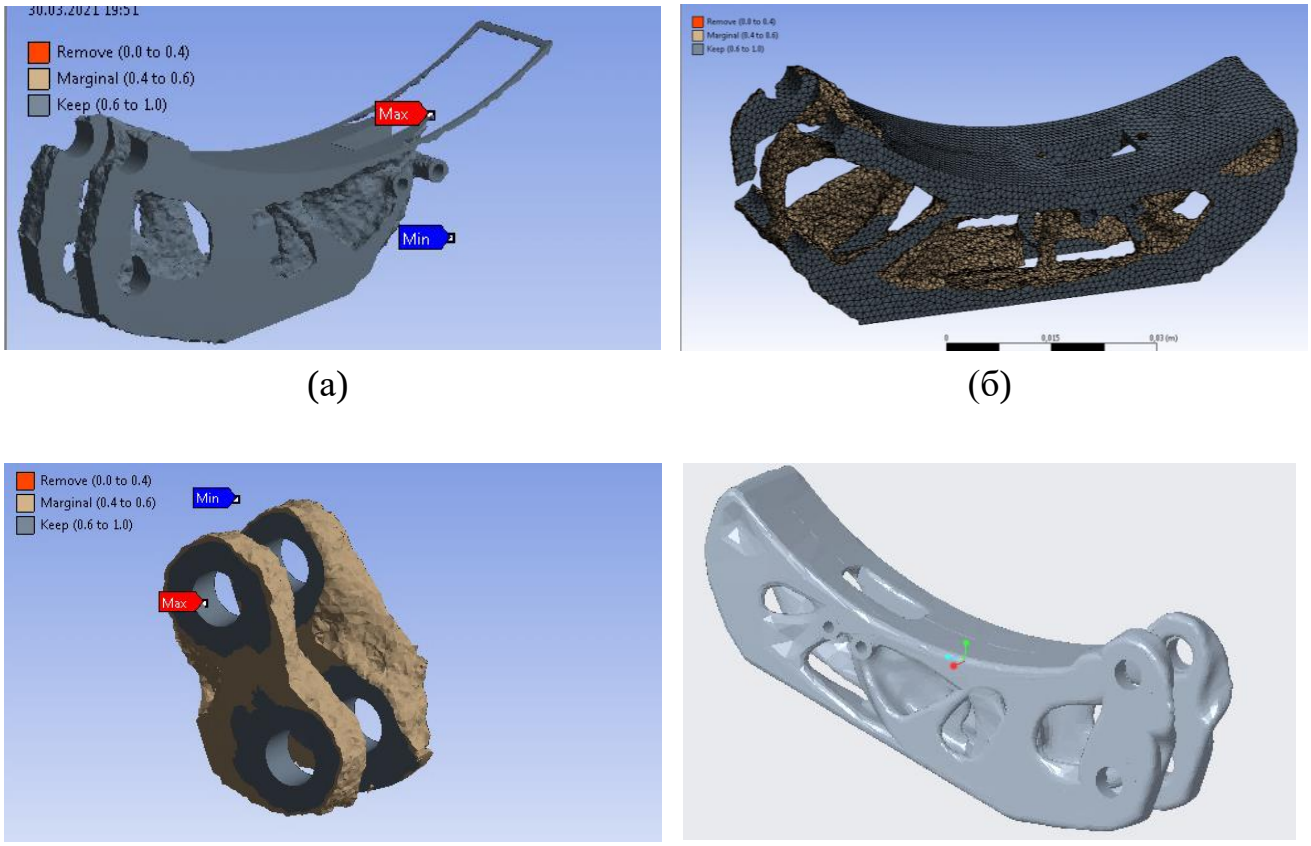


Рисунок 2 – Результаты топологической оптимизации для схем нагружения: а – максимальная статическая нагрузка, б – удар, в – динамическая нагрузка, и итоговая модель шатуна (г)

Еще одна проблема, требующая отдельного решения, – это поверхности оптимизированных фрагментов, которые требуют сглаживания даже при высокой плотности конечно-элементной сетки. Первичная обработка отдельных фрагментов в CAD-модуле SpaceClaim пакета ANSYS была направлена на снижение сложности модели. Она заключалась в переупорядочивании поверхностной сетки путем чередования двух операций, а именно сглаживания и объединения отдельных полигонов. Чтобы получить окончательную модель путем наложения оптимизированных и упрощенных фрагментов, эти фрагменты были импортированы в формате .stl в бесплатное программное обеспечение Blender. Окончательная обработка помимо объединения моделей включала восстановление поверхностей контакта с другими деталями в сборке, которые были искажены при оптимизации и сглаживании.

После применения топологической оптимизации спроектированные детали получают сложную геометрию, которую трудно выполнить механической обработкой. В данной работе, прототип захвата был собран из деталей, напечатанных на 3D-принтере. Оптимизированные детали распечатаны АБС-пластиком на принтере MakerBot Replicator 2X. Полученный данным способом шатун захватного устройства и прототип всего устройства в сборе приведены на рис. 3 (а) и рис. 3 (б) соответственно.

(а) (б)

Рисунок 3 – Изготовленный на 3D-принтере шатун пальца (а) и прототип захватного устройства в сборе (б)

Готовые к печати модели деталей с оптимизированной геометрией были перенесены в формате .stl из программы Blender в программу MakerBot Print. В программе MakerBot Print были подготовлены управляющие программы, задающие траекторию движения печатающего устройства и плотность заполнения объема материалом. Технология изготовления деталей методом 3D-печати требует добавления в основную геометрию опорных конструкций, которые после печати

удалялись вручную. Также ответственные поверхности распечатанных моделей требуют ручной доработки для получения необходимых размеров и шероховатости.

Заключение

В ходе выполнения представленной работы было спроектировано трехпальцевое механическое захватное устройство робота для сбора и сортировки плодов садоводства. При разработке ответственных деталей захвата, контактирующих с объектами, были применены принципы организации соединительных тканей живых организмов для достижения высоких показателей прочности, жесткости и эластичности при малой массе. Реализация этих принципов была достигнута выполнением расчета прочности при различных схемах нагружения совместно с топологической оптимизацией геометрии деталей по признаку минимизации массы в пакете ANSYS на основе данных концептуального проектирования. Схемы нагружения были сформированы с применением суперпозиционного подхода с выделением отдельных факторов воздействия и последующим объединением результатов различных анализов. Оптимизированные по различным расчетным схемам модели были доработаны и объедены в одну структуру с использованием специальных приложений объемного моделирования. По итоговым моделям были получены управляющие программы для изготовления деталей захватного устройства из пластика с помощью 3D-принтера. Принципы бионического дизайна организмов были использованы также при проектировании системы движения и системы управления. Результатом работы является действующий прототип захватного устройства.

Библиографический список

1. Ongaro F. Estimation of the effective properties of two-dimensional cellular materials: a review / F. Ongaro // Theoretical and Applied Mechanics Letters. – 2018. – Vol. 8, Iss. 4. – P. 209–230.
2. Progress in Bioinspired Dry and Wet Gradient Materials from Design Principles to Engineering Applications / X. Dong, H. Zhao, J. Li [et al.] // iScience. – 2020. – Vol. 23, Iss. 11. – P. 101749.
3. Stupin S. A. Topology optimization in designing of anthropomorphic gripper for a robot / S. A. Stupin, O. M. Ogorodnikova // Physics, Technologies and Innovation, AIP Conference Proceedings 2313 / ed. by A. Valeeva [et al]. – New York : American Institute of Physics, 2020. – P. 040011.
4. Огородникова О. М. Методы и инструменты цифрового машиностроения для компьютерного моделирования технологий и конструкций / О. М. Огородникова // Научное обозрение. – 2015. – № 10/1. – С. 209–212.
5. Огородникова О. М. Вычислительные методы в компьютерном инжиниринге : учеб. пособие / О. М. Огородникова. – Екатеринбург : УрФУ, 2013. – 130 с.
6. Башин К. А. Методы топологической оптимизации конструкций,

применяющиеся в аэрокосмической отрасли / К. А. Башин, Р. А. Торсунов, С. В. Семенов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2017. – № 4 (51). – С. 51–61.
7. Огородников А. И. Модель совместного движения человека и робота-экзоскелета для создания системы управления / А. И. Огородников, И. М. Проничев, О. М. Огородникова // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. – 2017. – Т. 16, № 1. – С. 98–101.
8. Проничев И. М. Об опыте проектирования робототехнического комплекса для неразрушающего контроля / И. М. Проничев, О. М. Огородникова // Проблемы машиностроения и автоматизация. – 2016. – № 3. – С. 36–40.
9. Towards an Efficient Tomato Harvesting Robot: 3D Perception, Manipulation, and End-Effector / J. Jun, J. Kim, J. Seol [et al.] // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 17631–17640.
10. Ali W. Method of ripe tomato detecting for a harvesting robot / W. Ali, O. M. Ogorodnikova // Physics, Technologies and Innovation, AIP Conference Proceedings 2174 / ed. by A. Valeeva [et al]. – New York : American Institute of Physics, 2019. – P. 020146.

УДК 539.1.047:576.3

Султанова Т.Р., Вазиров Р.А., Улитко М.В., Соковнин С.Ю.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАНОЧАСТИЦ ДИОКСИДА ЦЕРИЯ НА РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЛИМФОСАРКОМЫ

Аннотация. Была изучена способность наночастиц CeO_2 модифицировать радиочувствительность клеток лимфосаркомы крысы. По результатам эксперимента наночастицы CeO_2 увеличили жизнеспособность клеток при облучении.

Ключевые слова: наночастицы диоксида церия, лифосаркома крысы, RLC, ионизирующее излучение, радиочувствительность

Abstract. The ability of CeO_2 nanoparticles to modify the radiosensitivity of rat lymphosarcoma cells was studied. According to the results of the experiment, the CeO_2 nanoparticles caused an increase in the viability of cells under irradiation.

Keywords: cerium dioxide nanoparticles, rat lymphosarcoma cells, RLC, ionizing radiation, radiosensitivity

Введение

Нанотехнология – перспективное и стремительно развивающееся направление, которое открывает для человека множество новых возможностей в различных сферах, в том числе в медицине и фармакологии.

Определённый интерес для исследований представляют наночастицы, поскольку на наноуровне материалы приобретают свойства, отличающиеся от таковых на макроуровне: наночастицы обладают увеличенной площадью реакционной поверхности, большой адсорбционной ёмкостью, высокой каталитической активностью и реакционной способностью. Это влечёт за собой более интенсивное взаимодействие частиц с живыми системами, что может привести к различным биологическим эффектам.

Помимо этого, у оксидов металлов переход в наноразмерное состояние приводит к резкому изменению кислородной нестехиометрии, что является основой биологической активности этих нанопорошков. Наночастицы различных оксидов металлов могут активно участвовать в окислительно-восстановительных процессах в живой клетке, особенно при инактивации активных форм кислорода (АФК).

В этом отношении наиболее интересны наночастицы диоксида церия (CeO_2), поскольку они обладают уникальными ферментоподобными свойствами: разложение перекиси водорода подобно каталазе, инактивирование супероксид-анионов подобно супероксиддисмутазе. Однако, в кислой среде каталазоподобная активность снижается, но возрастает оксидазоподобная активность, которая проявляется в окислительно-восстановительных реакциях. Кроме того,

наночастицы CeO_2 в отличие от супероксиддисмутазы также может инактивировать гидроксил-радикалы. Наночастицы CeO_2 могут инактивировать не только кислородные, но и другие свободные радикалы, например нитрозил-радикал NO, а также инактивировать как короткоживущие, так и стабильные радикалы.

Кроме того, наночастицы CeO_2 примечательны тем, что они могу регенерировать после реакции, то есть вступать в реакции многократно в отличие от традиционных антиоксидантов [1,2].

Всё это в целом позволяет снизить повреждающее действие активных форм кислорода, что имеет большое значение при радиотерапии опухолевых заболеваний, поскольку при воздействии ионизирующего излучения из-за окислительного стресса, вызванного образованием АФК, повреждаются не только злокачественные клетки, но и здоровые клетки. Поэтому весьма актуален поиск радиопротекторов для защиты нормальных клеток, а также радиосенсибилизаторов для увеличения эффективности лучевой терапии против опухолевых клеток [3].

Таким образом, ферментоподобные свойства наночастиц CeO_2 делают их весьма перспективным с точки зрения использования их как радиопротекторов, так как они позволили бы снизить повреждающее действие ионизирующего излучения при радиотерапии за счёт инактивации АФК. Кроме того, также возможно использование наночастиц CeO_2 в качестве радиосенсибилизаторов для опухолевых клеток, поскольку в области опухолевых клеток среда зачастую закислена, из-за чего ферментоподобные свойства наночастиц будут более сдвинуты к оксидазоподобным, что будет способствовать большему повреждению клеток и меньшей их защите от окислительного стресса.

Цель данного исследования – определить воздействие мезопористого нанопорошка CeO_2 на радиочувствительность культуры клеток лимфосаркомы крысы (RLC).

Для достижения данной цели был поставлен ряд задач:

1) Оценить изменение морфофунциональных параметров клеток лимфосаркомы после воздействия наночастиц CeO_2 без облучения;

2) Определить воздействие различных доз облучения на морфофункциональные параметры клеток лимфосаркомы;

3) Оценить радиомодификационные свойства наночастиц CeO_2 на клетках лимфосаркомы.

Материалы и методы эксперимента

Мезопористый нанопорошок CeO_2 был получен с помощью установки НАНОБИМ-2 в Институте электрофизики УрО РАН методом испарения импульсным электронным пучком в газе низкого давления. Зёрна синтезированных нанопорошков имели размер от 3 до 5 нм и высокую удельную поверхность до 190 $м^2/г$. При этом

размер агломератов составлял от 300 до 600 нм. Определение размеров агломератов проводилось на спектрометре методом динамического рассеяния света.

Для определения валентного состава проводилось исследование с помощью рентген фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Анализ панорамных фотоэлектронных спектров показывает наличие двухвалентных состояний церия в наночастицах. В РФЭС-спектре ионов церия в наночастицах CeO_2 пики Ce^{3+} 3d 3/2 (при энергиях связи 899,7 и 904,2 эВ) и Ce^{3+} 3d 5/2 (881,5 и 885,9 эВ) относительно сильны. Это указывает на то, что ионы Ce^{3+} находятся на поверхности наночастиц CeO_2. Расчетная плотность ионов Ce^{3+} в образце составляет 32% от общего объема, ионов Ce^{4+} – 68% [4].

Для получения стабильной суспензии наночастиц CeO_2 использовались стабилизаторы и ультразвуковое диспергирование. В качестве стабилизатора был выбран цитрат натрия.

Эксперимент проводился на клеточной культуре лимфосаркомы крысы (RLC).

Для проведения эксперимента клетки культивировали в CO_2 инкубаторе при температуре 37°С в атмосфере 5% CO_2, с использованием питательной среды DMEM и добавлением 10% эмбриональной телячьей сыворотки и стрептомицина в дозе 50 мкг/мл.

Культуральную среду меняли каждые 3 дня, а также производили микроскопический контроль за состоянием культуры с помощью инвертированного микроскопа Биолам-П1, при увеличении в 200 и 400 раз.

Пересев клеточных линий проводили при достижении культурой 80-90% конфлюента один раз в 3-4 дня.

Для исследования радиомодификационных свойств наночастиц CeO_2 клетки культивировали в течение 24-х часов в 24-луночных планшетах, после чего в лунки добавляли водные растворы наночастиц CeO_2 в конечных концентрациях 20, 50, 100 и 200 мкг/мл. В контрольные лунки наночастицы не добавляли.

Облучение клеток проводилось на установке для рентгенотерапии Xstrahl 300 (100-320 кэВ). В установке используется металлокерамическая рентгеновская трубка медицинского назначения. При облучении использовался фильтр №5 из Al толщиной 6 мм и аппликатор Jc выходным окном 20х20 см.

Клетки подвергались облучению квантами с граничной энергией 150 кэВ, в дозах 0,5, 5, 10 и 15 Гр. Часть клеток оставляли не облученной, чтобы определить, оказывают ли какое-либо действие сами наночастицы.

Определение поглощенной дозы (ПД) проводилось клиническим дозиметром PTW Nomex с гамма камерой. Погрешность измерения не превышала 2%.

Через 3 суток после экспериментального воздействия проводилась оценка морфофункционального состояния клеток в культуре. Полученные данные анализировались статистически.

Для определения жизнеспособности суспензия клеток гомогенизировалась после чего из неё отбирались 100 мкл, которые смешивались с 100 мкл трипанового синего. Этот краситель не способен проникнуть в клетку через неповрежденную мембрану, поэтому живые клетки им не окрашиваются, а окрашенные клетки считаются мертвыми. Подсчёт живых и мёртвых клеток производился в камере Горяева с помощью микроскопа Carl ZEISS Primo Star.

Вычислялся индекс жизнеспособности по формуле 1:

$$\text{ИЖ} = \frac{\text{Ж}}{\text{Ж} + \text{М}} \times 100\% \quad (1)$$

где ИЖ – индекс жизнеспособности; Ж – количество живых клеток; М – количество мёртвых клеток.

Также с помощью трипанового синего и камеры Горяева была оценена концентрация клеток по формуле 2:

$$\text{X} = \frac{a \times b}{c \times d} \quad (2)$$

где a – количество клеток живых и мёртвых, b – разведение, c – объём жидкости под квадратом, d – количество квадратов.

Для исследования морфологии клетки окрашивались по Романовскому-Гимзе. Поскольку культура RLC является суспензионной, для оценки морфологии делался мазок. Для этого всю суспензию клеток отбирали из лунки и осаждали на центрифуге при 1000 об/мин в течение 5 минут. Надосадочная жидкость сливалась, а осадок с клетками ресуспендировался. Далее суспензия клеток наносилась на предметное стекло, и делался мазок с помощью шлифовального стекла. Мазок высушивался, а затем клетки фиксировались 95%-м этанолом в течение 5-7 минут. После высушивания стёкол от спирта, производилась окраска красителем Романовского разведённого дистиллированной водой в соотношении 1:9. Окраска проводилась в течение 30 минут, после чего краситель смывался дистиллированной водой, а стёкла высушивались [5].

С помощью окулярного микрометра МОВ-1-15х и светового микроскопа Micros MC50 (Австрия) вычислялись линейные размеры ядер и самих клеток при увеличении 400 по формуле 3:

$$t = \frac{II - I}{\beta} \quad (3)$$

где t – линейные размеры объекта; II-I – разность отсчётов; β – линейное увеличение объектива.

На основании этих данных высчитывалось площадь ядер и клеток. Также определялось ядерно-цитоплазматическое отношение по формуле 4:

$$\text{ЯЦО} = \frac{S\text{я}}{S\text{ц}} \quad (4)$$

где ЯЦО – ядерно-цитоплазматическое отношение; S я – площадь ядра; S ц – площадь цитоплазмы.

Также были получены микрофотографии мазков на микроскопе Carl ZEISS Primo Star с помощью цифровой камеры YW500 и программы «ADFImageCapture» при увеличении 400.

Статистическую обработку результатов проводили, используя компьютерные программы «Microsoft Excel» и «STATISTICA 10». Вычислялось среднее значение и ошибка среднего. Результаты экспериментов представлены как среднее значение ± ошибка среднего.

Для оценки значимости различий между группами использовался критерий Манна-Уитни. При вероятности ошибки (p) < 0,05 различия между средними значениями считались достоверными.

Воздействие наночастиц CeO_2

При внесении наночастиц CeO_2 в культуру клеток без дальнейшего облучения не наблюдалось изменения её жизнеспособности (Рис. 1). Из этого можно сделать вывод, что эти наночастицы не оказывают цитотоксического воздействия на данную культуру.

Однако наблюдалось снижение количества клеток при добавлении наночастиц CeO_2 в концентрациях 20, 50 и 200 мкг/мл, что может свидетельствовать о снижении их пролиферативной активности (Рис. 2). При добавлении концентрации 100 мкг/мл пролиферативная активность не снизилась, причём наблюдается увеличение размеров ядер клеток (Табл. 1). Возможно, возросла синтетическая активность клеток, позволившая им сохранить пролиферативный потенциал.

Воздействие облучения

При облучении клеток наблюдалось постепенное снижение их жизнеспособности с увеличением дозы, что является последствием их повреждения непосредственно ионизирующим излучением, а также образующимися активными формами кислорода (Рис. 1).

Также происходило статистически значимое уменьшение количества клеток при облучении ПД равной 10 и 15 Гр, что свидетельствует о снижении их пролиферативной активности (Рис 2).

При облучении размеры ядер увеличивались с ростом ПД. На 5 Гр уменьшилась цитоплазма, за счёт чего произошло увеличение ЯЦО. На 15 Гр цитоплазма увеличилась, но ЯЦО осталось неизменным (Табл. 2).

Таким образом, облучение оказывает повреждающее действие на клетки за счёт прямого разрушения компонентов излучением, а также окислительного стресса, вызванного активными формами кислорода и свободными радикалами.

Воздействие наночастиц CeO_2 на радиочувствительность

При облучении культуры ПД равной 0,5 Гр с добавлением наночастиц, жизнеспособность клеток не изменилась (Рис.1). Однако при добавлении наночастиц в концентрации 200 мкг/мл наблюдается увеличение количества клеток, что может говорить об увеличении их пролиферативной активности (Рис. 2). Причём, на этой концентрации наблюдается уменьшение площади ядра относительно контроля концентрации данного облучения, что делает её ближе к контролю необлучённых клеток (Табл. 3).

При облучении ПД равной 5 Гр наблюдается повышение жизнеспособности при добавлении наночастиц в концентрации 20 мкг/мл (Рис. 1). Также произошло снижение количества клеток при внесении наночастиц в концентрациях 20, 100 и 200 мкг/мл, что говорит об уменьшении их пролиферативной активности (Рис. 2). Причём, при добавлении 20 мкг/мл наблюдается увеличение площади цитоплазмы по сравнению с контролем концентрации данного облучения, однако она становится ближе к контролю без облучения, а при добавлении 100 мкг/мл снижается ЯЦО за счёт уменьшения ядра и также становится ближе к контролю без облучения (Табл. 4).

При облучении ПД равной 10 Гр жизнеспособность повысилась при добавлении наночастиц в концентрации 50 мкг/мл (Рис. 1). Количество клеток и морфологические параметры при этом остались неизменным (Рис. 2, табл. 5).

При облучении ПД равной 15 Гр жизнеспособность повысилась при внесении наночастиц в концентрациях 50 и 100 мкг/мл (Рис. 1). При этом добавление наночастиц в концентрации 100 мкг/мл также увеличило количество клеток, что говорит об увеличении их пролиферативной активности (Рис. 2). Причём при концентрации в 50 мкг/мл уменьшается площадь цитоплазмы относительно контроля концентрации данного облучения, но становится ближе к контролю без облучения (Табл. 6).

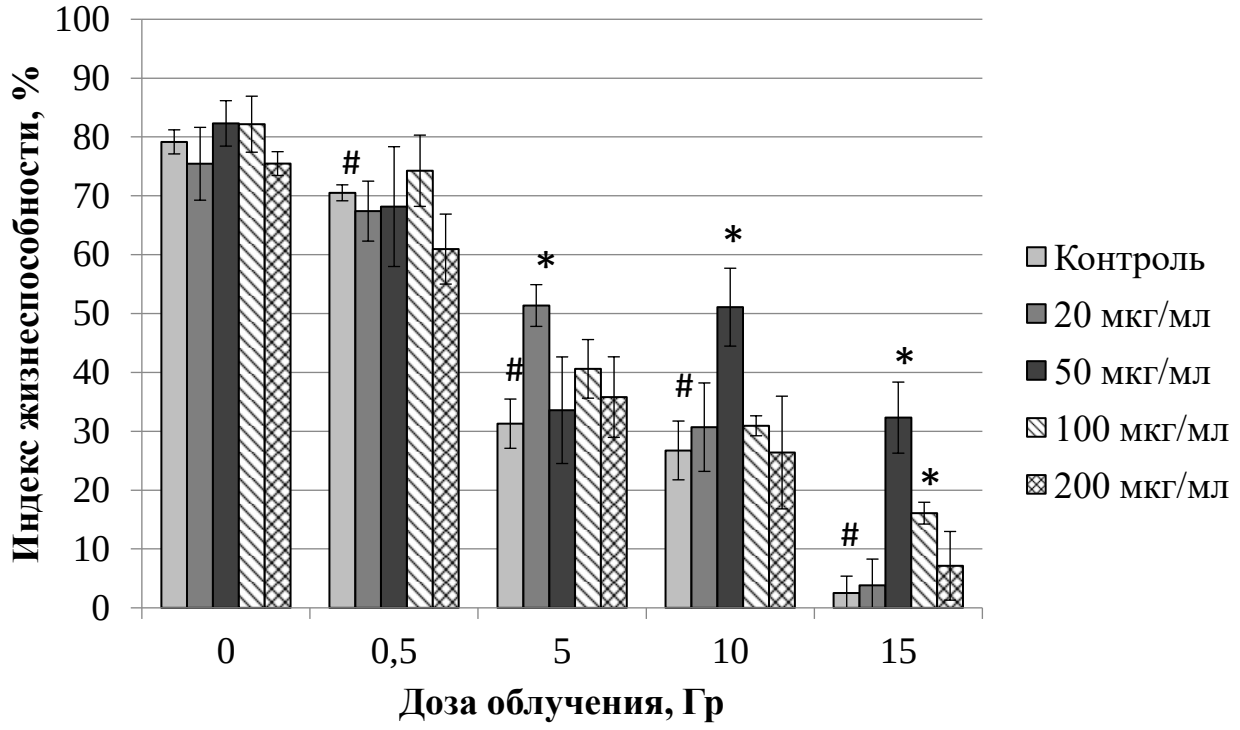


Рисунок 1 – Влияние наночастиц CeO_2 на жизнеспособность культуры клеток RLC (* – различие с контролем концентрации достоверно ($p<0,05$), # – различие с контролем облучения достоверно ($p<0,05$))

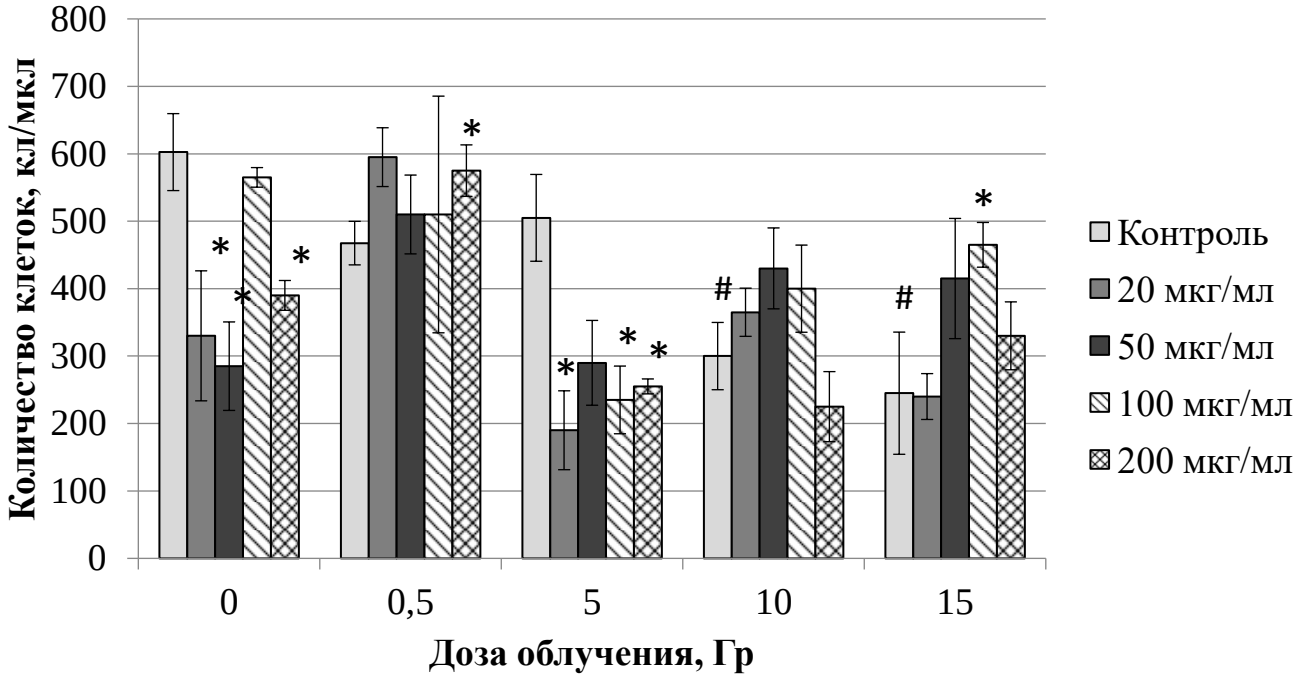


Рисунок 2 – Изменение количества клеток культуры клеток RLC при добавлении наночастиц CeO_2 (* – различие с контролем концентрации достоверно ($p<0,05$), # – различие контролем облучения достоверно ($p<0,05$))

Таблица 1 – Воздействие наночастиц на морфологические параметры

	Концентрация наночастиц, мкг/мл				
Параметр	Контроль	20	50	100	200
Площадь ядра, мкм^2	55,76 ± 6,75	93,92 ± 20,54	69,00 ± 8,96	99,66 ± 14,47*	77,65 ± 9,27
Площадь цитоплазмы, мкм^2	83,25 ± 10,23	117,25 ± 26,01	88,40 ± 6,36	87,72 ± 9,66	83,52 ± 10,08
ЯЦО, у.е.	0,77 ± 0,15	0,88 ± 0,16	0,80 ± 0,10	1,20 ± 0,20	1,00 ± 0,15
* – различие с контролем достоверно (p<0,05)					

Таблица 2 – Воздействие облучения на морфологические параметры

	Доза облучения, Гр				
Параметр	Контроль	0,5	5	10	15
Площадь ядра, мкм^2	55,76 ± 6,75	87,26 ± 9,27*	116,80 ± 27,76*	131,41 ± 14,85*	107,13 ± 11,28*
Площадь цитоплазмы, мкм^2	83,25 ± 10,23	82,16 ± 7,44	57,21 ± 7,50*	112,95 ± 22,07	181,22 ± 20,87*
ЯЦО, у.е.	0,77 ± 0,15	1,12 ± 0,16	2,08 ±0,43*	1,31 ±0,16*	0,64 ± 0,09
* – различие с контролем достоверно (p<0,05)					

Таблица 3 – Воздействие наночастиц на морфологические параметры при облучении 0,5 Гр

	Концентрация наночастиц, мкг/мл				
Параметр	Контроль	20	50	100	200
Площадь ядра, мкм^2	87,26 ± 9,27	69,13 ± 6,93	68,58 ± 12,60	74,15 ± 5,97	68,04 ± 6,20*
Площадь цитоплазмы, мкм^2	82,16 ± 7,44	84,12 ± 3,21	74,56 ± 3,97	71,16 ± 4,70	82,89 ± 6,29
ЯЦО, у.е.	1,12 ± 0,16	0,84 ± 0,09	0,94 ± 0,17	1,07 ± 0,09	0,86 ± 0,09
* – различие с контролем достоверно (p<0,05)					

Таблица 4 – Воздействие наночастиц на морфологические параметры при облучении 5 Гр

	Концентрация наночастиц, мкг/мл				
Параметр	Контроль	20	50	100	200
Площадь ядра, мкм^2	116,80 ± 27,76	97,24 ± 13,58	82,31 ± 10,12	70,85 ± 6,22	95,96 ± 13,61
Площадь цитоплазмы, мкм^2	57,21 ± 7,50	82,40 ± 10,62*	60,77 ± 5,69	63,14 ± 6,40	76,22 ± 9,40
ЯЦО, у.е.	2,08 ± 0,43	1,35 ± 0,24	1,40 ± 0,16	1,21 ± 0,13*	1,27 ± 0,12
* – различие с контролем достоверно (p<0,05)					

Таблица 5 – Воздействие наночастиц на морфологические параметры при облучении 10 Гр

	Концентрация наночастиц, мкг/мл				
Параметр	Контроль	20	50	100	200
Площадь ядра, мкм^2	131,41 ± 14,85	90,42 ± 10,96	111,62 ± 11,35	139,70 ± 15,09	112,64 ± 14,43
Площадь цитоплазмы, мкм^2	112,95 ± 22,07	83,70 ± 6,71	84,20 ± 7,70	108,08 ± 11,74	93,34 ± 24,31
ЯЦО, у.е.	1,31 ± 0,16	1,07 ± 0,08	1,41 ± 0,19	1,36 ± 0,12	1,38 ± 0,15

Таблица 6 – Воздействие наночастиц на морфологические параметры при облучении 15 Гр

	Концентрация наночастиц, мкг/мл				
Параметр	Контроль	20	50	100	200
Площадь ядра, мкм^2	107,13 ± 11,28	120,97 ± 16,00	90,42 ± 15,13	118,80 ± 19,21	102,79 ± 12,42
Площадь цитоплазмы, мкм^2	181,22 ± 20,87	170,70 ± 22,13	92,13 ± 21,84*	164,89 ± 34,30	170,84 ± 22,30
ЯЦО, у.е.	0,64 ± 0,09	0,78 ± 0,11	1,53 ± 0,45	0,83 ± 0,13	0,61 ± 0,03
* – различие с контролем достоверно ($p<0,05$)					

Таким образом, добавление наночастиц приводило к повышению жизнеспособности клеток при облучении. При добавлении малых концентраций наночастиц в 20 мкг/мл данный эффект наблюдался для образцов, облучаемых ПД равной 5 Гр. Для образцов, облучаемых ПД равной 10 и 15 Гр, радиопротекторные свойства проявлялись при большей концентрации наночастиц в 50 и 100 мкг/мл (Рис. 1).

Отсутствие эффекта при более высоких концентрациях наночастиц возможно происходит из-за их агломерации, что увеличивает размеры частиц и ведёт к потере наночастицами своих свойств.

Скорее всего радиопротекторный эффект является результатом инактивации активных форм кислорода наночастицами CeO_2 за счёт их ферментоподобного действия.

Однако данные, полученные по пролиферативной активности клеток, неоднозначны. Наблюдалось снижение количества клеток при добавлении наночастиц CeO_2 в концентрациях 20, 50 и 200 мкг/мл в образцы без дальнейшего облучения, а также при облучении в 5 Гр на концентрациях наночастиц CeO_2 20, 100 и 200 мкг/мл. Но при облучении дозами в 0,5 и 15 Гр и концентрациях наночастиц CeO_2 в 200 и 100 мкг/мл соответственно наблюдалось увеличение количества клеток (Рис. 2). Увеличение пролиферативной активности можно связать с радиопротекторной активностью наночастиц CeO_2. Снижение пролиферативной активности может быть связано с особенностями самой клеточной культуры или состоянием поверхности наночастиц, что требует дальнейших более глубоких исследований механизмов взаимодействия наночастиц с клетками.

Заключение

Таким образом, в ходе эксперимента была установлена способность наночастиц CeO_2 модифицировать радиочувствительность клеточной культуры лимфосаркомы крысы. В целом не наблюдалось цитотоксического действия наночастиц CeO_2 на клетки данной культуры. Кроме того, за счёт введения этих наночастиц повышалась жизнеспособность клеток при облучении, что говорит о радиопротекторном действии наночастиц CeO_2 на данную опухолевую культуру, что, однако, нежелательно при радиотерапии опухолевых заболеваний. Но наблюдающееся в некоторых случаях снижение пролиферативной активности клеток при внесении наночастиц CeO_2 может иметь положительный эффект при радиотерапии, так как замедление темпов роста опухолевых клеток всё же может повысить шансы на более успешное лечение.

Кроме того, важно решить проблему возможной агломерации наночастиц, поскольку это может очень сильно повлиять на свойства наночастиц и их взаимодействие с клетками. В дальнейшем необходимо найти ПАВ для эмульсии и провести дополнительные исследования.

Важно продолжить исследование воздействия наночастиц диоксида церия на клеточные культуры и живые системы в целом, чтобы полностью выяснить пути и механизмы их действия, что позволит сделать вывод о возможности их применения в медицинской сфере.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Чешского научного фонда в рамках научного проекта № 20-58-26002.

Авторы признательны В.Г. Ильвесу за получение нанопорошков.

Библиографический список

1. Wason M. S. Cerium oxide nanoparticles: potential applications for cancer and other diseases / M. S. Wason, J. Zhao // American journal of translational research. – 2013. – Vol. 5, Iss. 2. – P. 126–131.
2. Protection from radiation-induced pneumonitis using cerium oxide nanoparticles / J. Colon, L. Herrera, J. Smith [et al.] // Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine. – 2009. – Vol. 5, Iss. 2. – P. 225–231.
3. Наноматериалы на основе диоксида церия: свойства и перспективы использования в биологии и медицине / А. Б. Щербаков, Н. М. Жолобак, В. К. Иванов [и др.] // Біотехнологія. – 2011. – Т. 4, № 1. – С. 9–28
4. Physicochemical characterization and antioxidant properties of cerium oxide nanoparticles / R. A. Vazirov, S. Yu. Sokovnin, V. Ilves [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1115, Iss. 3. – P. 032094.
5. Фрешни Р. Я. Культура животных клеток : практ. рук. / Р. Я. Фрешни. – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 691 с.

УДК 621.03(597)

Та Ван Тхыонг, Ташлыков О. Л., Фам Хак Туйен, Ву Хоанг Хай

РАЗРАБОТКА РУКОВОДСТВА ПО ПОДГОТОВКЕ ОТЧЕТА ОБ ОЦЕНКЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ДЛЯ ЦЕНТРА ЯДЕРНОЙ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ ВЬЕТНАМА

Аннотация. Представлена структура Руководства по подготовке отчета об оценке воздействия на окружающую среду (ОВОС) для проекта исследовательского ядерного реактора Вьетнама. Описаны правовые и технические основы для подготовки отчета, требования к отчитывающейся организации.

Ключевые слова: окружающая среда; исследовательский ядерный реактор; нормативные документы; правовые документы; атомная энергетика; ядерное право; ядерная политика; экология; ОВОС.

Abstract. The structure of Guidance on the preparation of the Environmental Impact Assessment (EIA) report for the Vietnam nuclear research reactor project is presented. The legal and technical basis for the preparation of the report, the requirements for the reporting organization are described.

Keywords: environment; nuclear research reactor; regulations; legal documents; nuclear power; nuclear law; nuclear policy; ecology; EIA.

Введение

Исследовательские ядерные реакторы (ИЯР) являются основными установками, способствующими развитию инфраструктуры и программ в области национальной ядерной науки и технологий. ИЯР используются для производства радиоизотопов для медицины и промышленности, генерирования пучков нейтронов для исследований материалов и неразрушающих испытаний, оказания услуг по облучению, а также проведения исследований в сфере культурного наследия и окружающей среды. Они вносят стратегический вклад в образование и подготовку кадров [1], [2], [3].

Существует большое разнообразие конструкций ИЯР с тепловой мощностью от нуля (критические и подкритические сборки) до ~200 МВт. ИЯР могут работать в стационарных или импульсных режимах.

Единственный во Вьетнаме Далатский ИЯР (г. Далат) мощностью 250 кВт работает с марта 1963 г. В 1979-1982 гг. он был реконструирован и его мощность увеличилась до 500 кВт [4]. Реактор предназначен для производства радиоизотопов, нейтронно-активационного анализа, фундаментальных и прикладных исследований и обучения. Однако растущие потребности в этой продукции и исследованиях не могут быть удовлетворены из-за ограниченной мощности реактора. Для замены Далатского ИЯР планируется построить новый многоцелевой исследовательский

реактор мощностью 10 МВт [5].

Вьетнам принял государственный план по строительству нового ИЯР. Международные миссии по оценке ядерной инфраструктуры для ИЯР позволяют оказать поддержку и предоставить Вьетнаму рекомендации по осуществлению проекта. Оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС) нового ИЯР Вьетнама является актуальной задачей. Поэтому разработка Руководства по подготовке отчета об ОВОС является чрезвычайно важной и полезной для регулирующих органов, подрядчиков и т.п.

Целью представленной работы является анализ нормативных документов Российской Федерации (РФ), других стран, включая рекомендации МАГАТЭ, по разработке Руководства по подготовке отчета об ОВОС для проекта Центра ядерной науки и технологий (ЦЯНТ) Вьетнама в соответствии с правовыми и техническими требованиями Вьетнама.

Для достижения данной цели решались задачи по сбору, обобщению и анализу требований правил и стандартов Вьетнама для экологической оценки в соответствии с указаниями Министерства природных ресурсов и окружающей среды (MONRE), а также руководящих указаний МАГАТЭ, правил и норм в области атомной энергетики России и других стран. Ядерная программа Вьетнама регулируется законом по атомной энергии № 18/2008-QH12, принятым в 2008 г. [6]. В этом Законе в Статье 38 «Утверждение площадки для строительства ядерных объектов» говорится, что отчет по ОВОС является одним из обязательных документов, которые необходимо включить в Досье по согласованию для утверждения площадки строительства.

Проект строительства ЦЯНТ Вьетнама

Началом сотрудничества между Социалистической Республикой Вьетнам (СРВ) и Российской Федерацией (РФ) по строительству ЦЯНТ стал официальный визит в РФ Премьер-министра Вьетнама в 2009 г. Основная цель ЦЯНТ – продвижение исследований, развитие национального потенциала ядерной науки и технологий; подготовка высококвалифицированных специалистов, способных осваивать передовые ядерные технологии; расширение применения атомной энергии в различных областях; создание координационного центра международного сотрудничества Вьетнама с другими странами в области атомной энергии.

В 2010 г. для руководства проектом АЭС «Ниньтхуан» были сформированы Национальный руководящий комитет и Национальный совет по ядерной безопасности. Была организована подготовка кадров для АЭС [7], [8]. В 2011 г. между Правительствами РФ и СРВ было подписано соглашение о сотрудничестве в сооружении ЦЯНТ [9]. В 2012 г. в целях реализации Стратегии мирного использования ядерной энергии был утвержден проект «Укрепление потенциала исследований, развертывание и техническая помощь для развития применения

атомной энергии и обеспечение безопасности». В этом проекте строительство ЦЯНТ с новым ИЯР определяется как ключевая задача по созданию и развитию Вьетнамского института атомной энергии (VINATOM – Vietnam Atomic Energy Institute) и достижения ведущей позиции в регионе.

Несмотря на отказ в 2016 г. от строительства АЭС из-за экономических факторов, Вьетнам и Россия подписали в 2017-2018 гг. Меморандумы о взаимопонимании о строительстве ЦЯНТ и о сотрудничестве в выполнении информационно-коммуникационных работ по проекту ЦЯНТ.

После утверждения проекта инвестиционной политики VINATOM и связанные с ним подразделения под руководством Министерства науки и технологий Вьетнама (MOST – Ministry of Science and Technology) оперативно разработали и реализовали проект.

В 2019 г. Госкорпорация «Росатом» и MOST подписали Меморандум о взаимопонимании по продвижению проекта строительства ЦЯНТ. На данный момент будущее ядерной энергетики в структуре национального энергобаланса Вьетнама остается неясным, хотя не следует отметить, что Вьетнам не полностью исключил ядерную энергию [10].

MOST и другие подразделения Министерства работали с провинцией Донгнай и соответствующими подразделениями над организацией работ на участке реализации проекта. С конца 2020 г. осуществляется финансирование, выбор подрядчиков для разработки технико-экономического обоснования. В 2022 г. планируется начало строительства, в 2026 г. – ввод в эксплуатацию ИЯР.

Под строительство Центра выбрана площадка (100 га) в уезде Лонгхань провинции Донгнай, в 70 км от города Хошимин (рис. 1) [11]. Основным оборудованием ЦЯНТ является многоцелевой ИЯР мощностью 10 МВт. В состав ЦЯНТ входят также лаборатории технологий неразрушающего контроля, центры моделирования систем АЭС и материаловедения (рис. 2).

Проект ЦЯНТ представляет особую важность для Вьетнама, поскольку создает условия для развития ряда направлений экономики:

- прикладные и фундаментальные науки, использование изотопов в промышленности, материаловедение, неразрушающие методы контроля, разработка инновационных технологий и инженерии;
- здравоохранение (снижение смертности от онкологических и других заболеваний; улучшение качества и продолжительности жизни);
- подготовка специалистов для ядерно-энергетического и научного секторов, повышение качества высшего образования (создание экспериментальной базы для студентов и ученых);
- сельское хозяйство и пищевая промышленность (увеличение урожайности и срока хранения продукции путем облучения).

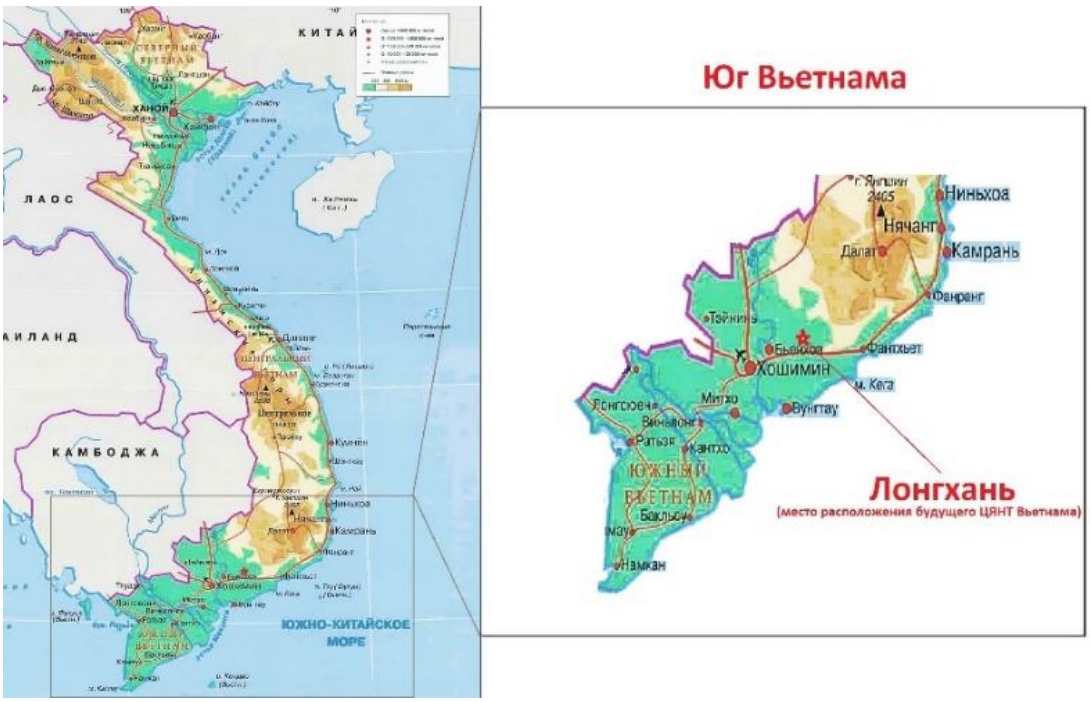


Рисунок 1 – Место размещения ЦЯНТ во Вьетнаме

Рисунок 2 – Проект ЦЯНТ с новым исследовательским реактором

Ответственность за создание правовой базы для реализации проекта возложена на MOST, которое также отвечает за Руководство подготовкой отчета об ОВОС ИЯР в координации с MONRE при экспертизе отчета об ОВОС.

Общие требования к ОВОС для ИЯР

ОВОС представляет собой анализ и прогноз воздействия на окружающую среду, которое может возникнуть в результате реализации проектов. На его основе вырабатываются решения и меры по усилению положительного и минимизации негативных воздействий, способствуя реализации инвестиционного проекта.

Точность прогноза воздействия зависит от двух основных групп факторов: входных данных для прогноза и методов прогнозирования.

Для полноценности входных данных, важно учитывать основные объекты: *объект, вызывающий воздействие* (мероприятия по реализации проекта способны оказывать воздействие на окружающую среду) и *объект воздействия* (компоненты окружающей среды, включая соответствующие социально-экономические факторы, которые могут быть затронуты проектом). Требуемый уровень и доступность входных данных сильно различаются в зависимости от типа проекта, его местоположения и применяемого метода прогнозирования.

Метод прогнозирования также зависит от многих факторов (уровень доступности входных данных, тип проекта, место его расположения и т. д.).

ОВОС проводится заказчиками, проектными организациями в целях [12]:

– всестороннего рассмотрения возможных последствий в области охраны окружающей среды, рационального использования природных ресурсов и связанных с ними социально-экономических последствий, иных последствий планируемой деятельности для окружающей среды, включая здоровье и безопасность людей, животный мир, растительный мир, земли (включая почвы), недра, атмосферный воздух, водные ресурсы, климат, ландшафт, а также для объектов историко-культурных ценностей и (при наличии) взаимосвязей между этими последствиями до принятия решения о ее реализации;
– поиска обоснованных проектных решений (с учетом экологических и экономических факторов), способствующих предотвращению или минимизации возможного воздействия планируемой деятельности на окружающую среду и здоровье человека;
– принятия эффективных мер по минимизации вредного воздействия планируемой деятельности на окружающую среду и здоровье человека;
– определения возможности (невозможности) реализации планируемой деятельности на конкретном земельном участке.

Материалы ОВОС являются документом, обобщающим результаты исследований по ОВОС реализации проектных решений по проекту ЦЯНТ и вариантов технических решений, проведенных на основании прогнозных оценок, государственных докладов, официальных баз данных, фондовых и литературных источников с привлечением экспертов по отдельным вопросам. В соответствии с Техническим заданием работа по ОВОС не предполагала проведение новых научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также инженерно-экологических изысканий. При выявлении недостатка в исходных данных и других неопределенностей по оценке воздействия намечаемой деятельности на окружающую среду необходимо было описать данные неопределенности, оценить

степень их значимости и разработать рекомендации по их устранению на последующих этапах проектирования [13].

ОВОС предусматривает активное участие общественности и обеспечивает учет общественного мнения при принятии окончательного решения о размещении ЦЯНТ и о его радиационной и экологической безопасности в процессе размещения, строительства, эксплуатации, модернизации и выводе из эксплуатации [14].

Защита окружающей среды подразумевает защиту и сохранение диких видов животных и растений; экологических товаров и услуг (производство продуктов питания и кормов); ресурсов, используемых в сельском и лесном хозяйстве, рыболовстве и туризме; объектов, используемых в духовной, культурной и развлекательной деятельности; почвы, воды и воздуха; естественных процессов (например, круговорот углерода, азота и воды) [15].

В настоящее время во Вьетнаме охрана окружающей среды в целом и ОВОС, в частности, осуществляются на основе Закона об охране окружающей среды и подзаконных актов. Инвестиционные проекты, составляющие отчеты об ОВОС, утверждаются Советом по оценке на всех уровнях, от центрального до местного.

В постановлении Правительства Вьетнама [16] изложены общие положения для содержания отчетов по ОВОС для всех секторов производства. Поэтому потребовалось разработать отдельное Руководство по подготовке отчета об ОВОС применительно к ЦЯНТ для повышения качества оценки и экспертизы. Особенностью проекта ЦЯНТ является наличие ядерного топлива, следовательно, необходимо использовать международные договоры и документы МАГАТЭ по ОВОС для объектов использования атомной энергии (ОИАЭ). При этом в ОВОС ЦЯНТ Вьетнама важно использовать опыт в реализации аналогичных проектов стран с развитой ядерной инфраструктурой (например, Россия, США, Япония, Корея и т.д.).

Основные положения Руководства по подготовке отчета об ОВОС для проекта ЦЯНТ Вьетнама с целью соблюдения требований Законов об охране окружающей среды (2020) и об атомной энергии (2008), международных договоров сформулированы на следующих принципах:

- акцентирование на технических инструкциях и рекомендациях по выполнению;
- включение в Руководство глав и разделов в соответствии со структурой отчета по ОВОС, указанной в Постановлении [16] и Циркуляре MONRE [17];
- структуризация глав Руководства в соответствии со следующими требованиями: цели четко определяют роль и значение каждой главы для отчета по ОВОС; используется принцип включения необходимых требований и инструкций, чтобы гарантировать необходимую полноту, научность и точность отчета по ОВОС; содержание каждой главы

основывается на вьетнамских правилах, аналогичных руководящих документах МАГАТЭ и стран с развитой ядерной энергетикой;
– использование признанных в мире методов моделирования, расчета, конкретных данных, информации из действующих инструкций, исследовательских проектов и ОИАЭ ведущих стран мира.

Регулирующие органы и правовая основа для подготовки отчета по ОВОС

Далатский ИЯР находится в Далатском институте ядерных исследований, который является частью VINATOM. Во Вьетнаме существует несколько регулирующих органов, в соответствии с законодательством, но большинство функций по обеспечению безопасности, защиты и гарантий выполняет Вьетнамское агентство по радиационной и ядерной безопасности (VARANS – Vietnam Agency for Radiation and Nuclear Safety), которое находится в ведении MOST. VARANS занимается разработкой юридических документов, лицензированием, инспекцией, аварийным реагированием, обучением и обслуживанием национальной информационной системы, а также участвует в международном сотрудничестве в области радиационной безопасности и физической ядерной безопасности (рис. 3). Помимо VARANS и VINATOM продвигать использование ядерной энергии в стране поручено Вьетнамскому департаменту по атомной энергии (VAEA) [18].

Основные требования, предусмотренные в области охраны окружающей среды, сформулированы в Законах, законодательных актах и нормативных документах Социалистической Республики Вьетнам [16], [17], [19]-[21].

Формат и содержание Руководства по подготовке отчета по ОВОС и основные требования

Благодаря использованию, анализу и исследованию вьетнамских и международных материалов (Указания MONRE, MOST, МАГАТЭ), а также правил и норм России, США в области использования атомной энергии мы обобщили и разработали основное содержание, требуемое в Руководстве по подготовки отчета об ОВОС для проекта ЦЯНТ Вьетнама.

Руководство по подготовке отчета по ОВОС состоит из следующих основных частей: введение; краткое описание проекта (Глава 1); природные, социально-экономические условия и текущее состояние окружающей среды на территории проекта (Глава 2); оценка и прогноз воздействия проекта на окружающую среду, а также предложение мер и работ по охране окружающей среды и реагированию на чрезвычайные экологические ситуации (Глава 3); программа экологического менеджмента и надзора (Глава 4); результаты консультации (Глава 5); заключение, предложения и обязательства [22].

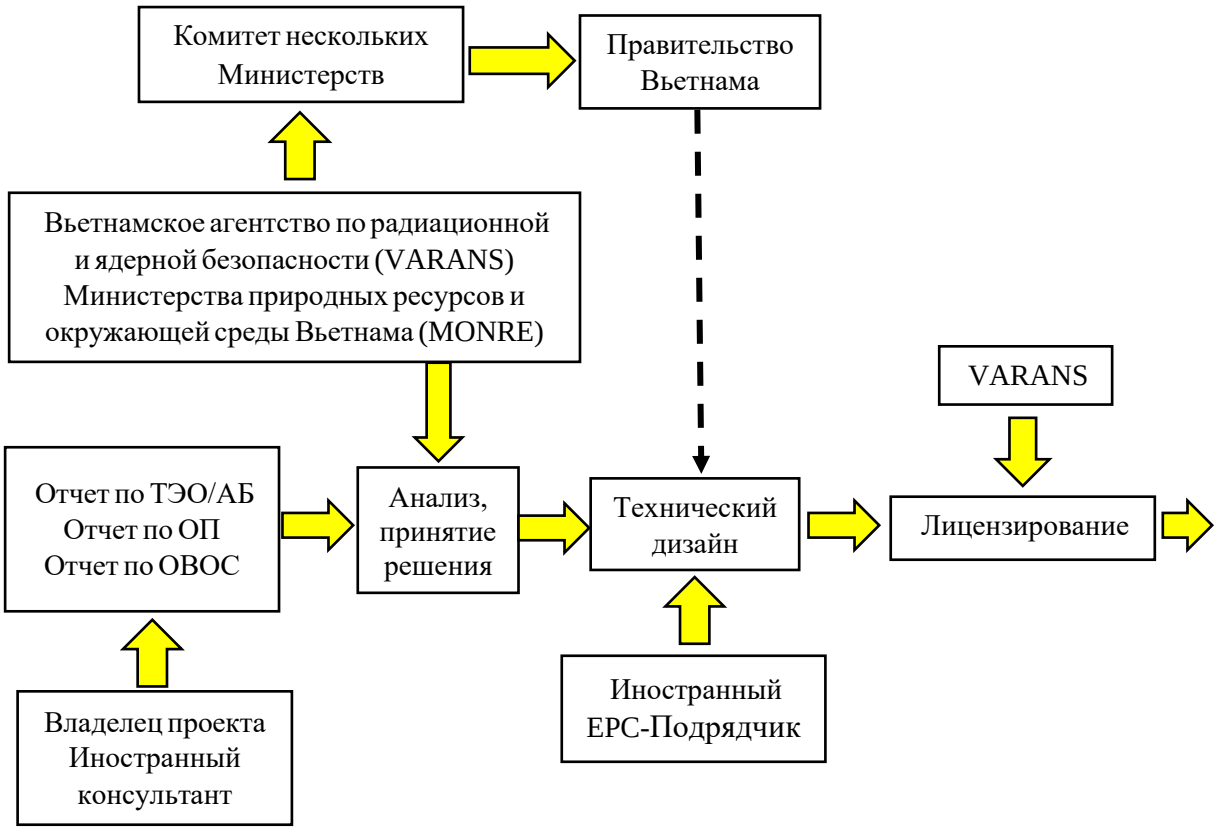


Рисунок 3 – Нормативные процедуры для реализации проекта ЦЯНТ Вьетнама: ТЭО – технико-экономическое обоснование, АБ – анализ безопасности, ОП – оценка площадки, ОВОС – оценка воздействия на окружающую среду, EPC (от англ. Engineering, Procurement and Construction) – способ контрактования в строительной отрасли

Содержание и порядок изложения информации в материалах ОВОС должны быть структурированы и логически последовательны. Структура материалов ОВОС предполагает:

– последовательное рассмотрение всех элементов и факторов, взаимодействие которых ожидается в результате реализации инвестиционного проекта ЦЯНТ (виды и источники возможного воздействия, факторы природной среды, включая социально-экономические и медико-биологические аспекты);
– анализ природных закономерностей многочисленных процессов, протекающих в данном регионе, оценку существующего уровня нарушений и изменений и прогноз изменения состояния компонентов окружающей среды в результате реализации намечаемой деятельности в области использования атомной энергии.

Результаты и их обсуждение

Составленные нами Руководства по подготовке отчета об ОВОС, способствуя повышению качества отчетности, качества оценки и экспертизы, а также общего успеха проекта в будущем, являются полезным инструментом и важным материалом Руководства для подрядчиков и регулирующих органов.

У Вьетнама есть длительный опыт управления, безопасной и эффективной эксплуатации ИЯР. Вьетнам полностью освоил вопросы ядерной науки и техники в производстве импортозамещающих радиоактивных фармацевтических препаратов для удовлетворения внутренних и экспортных потребностей. В технологической революции 4.0, помимо незаменимой роли в диагностике и лечении опасных заболеваний людей, радиоактивные изотопы из ядерных реакторов также играют решающую роль во многих областях, таких как: облучение, обслуживающее экспорт сельскохозяйственной продукции; подтверждение качества и трекинг пищевых продуктов и продуктов питания; неразрушающая оценка; оценка водных ресурсов; исследовательская гидрогеология, инженерная геология; защита окружающей среды и т.д.

Генеральный директор МАГАТЭ Юкия Амано в документе [23], опубликованном к 60-летию МАГАТЭ, заявил: «за последние 60 лет исследовательские реакторы стали центрами инноваций и повышения эффективности (исследований) ядерной науки и технологий».

Далатский ИЯР сможет эксплуатироваться примерно до 2028 г., когда израсходуется имеющееся ядерное топливо. Он станет одним из реакторов с самым долгим сроком службы в мире. Необходимо строительство ЦЯНТ с новым ИЯР для развития атомной науки и техники страны с почти 100-миллионным населением (к 2025 г.), чтобы не только сохранить, но и расширять применение ядерных технологий, производство радиоизотопов обеспечить подготовку специалистов для использования ядерной энергии во Вьетнаме.

Сооружение ЦЯНТ станет новой вехой в развитии атомной науки и техники Вьетнама. Страна будет иметь региональный ядерный исследовательский центр с современным оборудованием. Проект будет иметь множество социально-экономических положительных последствий за счет содействия применению ядерных технологий в здравоохранении, промышленности и сельском хозяйстве; и будет местом встречи сотен вьетнамских и международных ученых и специалистов в области ядерной энергетики для работы и проведения научных исследований, развития технологий и подготовки кадров.

Заключение

И в завершение мы хотели бы процитировать слова Президента Вьетнамского института атомной энергии (VINATOM) Чан Чи Тханя: «Проект строительства

ЦЯНТ – это крупный проект в области науки и технологий, атомной промышленности Вьетнама (спустя более 40 лет с момента начала восстановления Далатского ИЯР в 1979 г.). Этот проект станет будущим атомной отрасли в ближайшие 50-70 лет. Успешное строительство ЦЯНТ поднимет атомную отрасль на новый уровень, будет активно способствовать исследованиям, применению и внесет положительный вклад в социально-экономическое развитие. ЦЯНТ должен стать междисциплинарным научным центром, в котором проводятся фундаментальные и прикладные исследования; от ядерной физики – физики реакторов до материаловедения и испытаний; биологические исследования; производство радиоизотопов, радиоактивных фармацевтических субстанций и облучение кремнием; ядерная электроника; радиоактивная безопасность, а также ядерная безопасность; топливо, химия; обращение с радиоактивными отходами; подготовка кадров для атомной энергетики и т.д.» [24, 25].

Библиографический список

1. Nuclear Technology Review 2020 // IAEA (International Atomic Energy Agency). – Vienna, 2020. – P. 50–51.
2. Оптимизация состава гомогенных радиационно-защитных материалов применительно к планируемым условиям облучения / О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин, И. М. Русских [и др.] // Атомная энергия. – 2016. – Т. 121, № 4. – С. 233–236.
3. Русских И. М. Получение радиоактивных изотопов в исследовательском ядерном реакторе для экспериментальных исследований свойств гомогенных радиационно-защитных материалов / И. М. Русских, О. Л. Ташлыков // Труды первой научно-технической конференции молодых ученых УралЭНИН. – Екатеринбург, 2016. – С. 254–257.
4. Hien Nguyen. The history of Da Lat Nuclear Research Reactor / Hien Nguyen, L. M. Calkins, K. J. Kearfott. – Michigan : Department of Nuclear Engineering and Radiological Sciences, University of Michigan, 2015. – 48 p.
5. Conceptual Design of a 10 MW Multipurpose Research Reactor Using VVR-KN Fuel / Nhi-Dien Nguyen, K.-C.Nguyen, T.-N. Huynh [et al.]. – DOI 10/1155/2020/7972827 // Science and Technology of Nuclear Installations. – 2020. – Vol. 2020. – P. 1–2.
6. Закон Национального собрания. Закон атомной энергии. – URL: https://www.varans.vn/van-ban/22/18-2008-qh12.html (дата обращения: 13.07.2021).
7. О проблемах подготовки иностранных специалистов для атомной энергетики стран-партнеров Росатома в УрФУ / О. Л. Ташлыков, В. А. Климова, Та Ван Тхыонг [и др.] // Новые образовательные технологии в ВУЗе : сб. ст. XII междунар. науч.-метод. конф. : НОТВ–2015. – Екатеринбург, 2015. – С. 189–195.
8. Разработка учебных материалов на вьетнамском языке для подготовки специалистов для атомной энергетики Вьетнама / Ван Тхыонг Та, Мань Ха Хюи, О. Л. Ташлыков // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение.

Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика : материалы Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвящ. памяти проф. Н. И. Данилова (1945–2015). – Екатеринбург, 2019. – С. 773–776.
9. Duy Anh. First nuclear power plant project suspended / Duy Anh // Vietnam Economic Times : электрон. газ. – URL: http://www.vneconomictimes.com/article/vietnam-today/first-nuclear-power-plant-project-suspended (дата обращения: 13.07.2021).
10. О месте АЭС в развитии энергетики Вьетнама / Та Ван Тхыонг, Ха Хуи Мань // Энергетика и автоматизация в современном обществе : материалы ежегод. III Всерос. науч.-практ. конф. обучающихся и преподавателей (Санкт-Петербург, 3 июня 2020 г.). – Санкт-Петербург, 2020. – Ч. 1. – С. 78–84.
11. Tran Chi Thanh. Site survey and evaluation report and environmental impact assessment report / Tran Chi Thanh // VIER-1010 SEED Advisory meeting, 8th December 2020. – Hanoi, 2020. – URL: http://researchgate.net (accessed: 13.01.2020).
12. Положение о порядке проведения оценки воздействия на окружающую среду, требованиях к составу отчета об оценке воздействия на окружающую среду, требованиях к специалистам, осуществляющим проведение оценки воздействия на окружающую среду : метод. указ. : Постановление Совета М-ов Респ. Беларусь № 47 от 19.01.2017. – URL: https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C21700047 (дата обращения: 13.07.2021).
13. Киверов С. А. Оценка воздействия на окружающую среду при сооружении исследовательской ядерной установки многоцелевой исследовательский реактор на быстрых нейтронах МБИР в пределах промплощадки ОАО «ГНЦ НИИАР» / С. А. Киверов [и др.]. – Димитровград : ГНЦ НИИАР, 2014. – 48 с.
14. Разработка материалов оценки воздействия на окружающую среду в составе проектной и иной документации на осуществление видов деятельности в области использования атомной энергии МУ 1.5.1.99.0097–2012 : метод. указ. : Утв. Приказом ОАО «Концерн Росэнергоатом». – 2012. – URL: https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293769/4293769576.htm (дата обращения: 13.07.2021).
15. Prospective Radiological Environmental Impact Assessment for Facilities and Activities. № GSG-10 / IAEA (International Atomic Energy Agency) Safety Standards Series. – Vienna : IAEA, 2018. – 82 p. – ISBN 978-92-0-102518-0.
16. О внесении изменений и дополнений в ряд статей постановлений, детализирующих и регулирующих выполнение Закона об охране окружающей среды : Постановление Правительства № 40/2019/ND-CP от 13.05.2019. – URL: http://vbpl.vn/botainguyen/Pages/vbpq-van-ban-goc.aspx?ItemID=135365 (дата обращения: 13.07.2021).
17. Подробные положения по реализации ряда статей Постановления Правительства № 40/2019/ND-CP от 13 мая 2019 г. «О внесении изменений и дополнений в ряд статей постановлений, детализирующих и регулирующих выполнение Закона об охране окружающей среды и положения об управлении службами экологического мониторинга» : Циркуляр М-ва природ. ресурсов и окружающей среды № 25/2019/TT-BTNMT от 31.12.2019. – URL: http://vbpl.vn/TW/Pages/vbpq-

van-ban-goc.aspx?ItemID=140451 (дата обращения: 13.07.2021).
18. The dynamics of nuclear energy among ASEAN member states / Nur Azha Putra Abdul Azim. – DOI 10/1016/j.egypro.2017.12.731 // Energy Procedia. – 2017. – Vol. 143. P. 586–587.
19. Закон об охране окружающей среды : Закон Нац. собрания № 72/2020/QH14 от 17.11.2020. – URL: http://cenm.com.vn/luat-bao-ve-moi-truong-nam-2020-art144.html (дата обращения: 13.07.2021).
20. Положения о планировании охраны окружающей среды, стратегической оценке окружающей среды, оценке воздействия на окружающую среду и плане защиты окружающей среды : Постановление Правительства № 18/2015/ND-CP от 14.02.2015. – URL: http://vbpl.vn/TW/Pages/vbpq-van-ban-goc.aspx?dvid=13&ItemID=52325 (дата обращения: 13.07.2021).
21. Правила ядерной безопасности исследовательских ядерных реакторов : Циркуляр М-ва науки и технологий № 05/2020/TT-BKHCN от 30.10.2020. – URL: https://luatvietnam.vn/khoa-hoc/thong-tu-05-2020-an-toan-hat-nhan-voi-co-so-lo-phan-ung-hat-nhan-nghien-cuu-193338-d1.html (дата обращения: 13.07.2021).
22. Pham Khac Tuyen. Current stage of the development of guidance on the preparation of the environmental impact assessment report / Pham Khac Tuyen // VIER-1010 SEED Advisory meeting, 8th December 2020. – Hanoi, 2020. – URL: http://researchgate.net (date of access: 13.01.2020).
23. Research Reactor: Purpose and the future. Vol. 16. IAEA 60 Years Atoms for Peace and Development / IAEA (International Atomic Energy Agency) Safety Standards Series. – Vienna : IAEA, 2016. – 20 p.
24. Thanh Nhan. Building a new research reactor: Foresight is needed / Thanh Nhan // Tia Sang. – URL: https://tiasang.com.vn/khoa-hoc-cong-nghe/Xay-dung-lo-phan-ung-nghien-cuu-moi-Can-tam-nhin-xa-10447 (date of access: 13.07.2021).
25. Nguyen Thi Thu Ha. Conference to summarize the work in 2020 and orientations and tasks in 2021: Solving difficulties of the Research Center for Nuclear Science and Technology project / Nguyen Thi Thu Ha // VINATOM. – URL: https://vinatom.gov.vn/hoi-nghi-tong-ket-cong-tac-nam-2020-va-phuong-huong-nhiem-vu-nam-2021-thao-go-kho-khan-cua-du-an-trung-tam-nghien-cuu-khoa-hoc-cong-nghe-hat-nhan-rcnest/ (date of access: 13.07.2021).

УДК 669.715

Валихов В.Д., Кахидзе Н.И, Ахмадиева А.А., Мубараков Р.Г.

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ, УПРОЧНЁННОГО БАЗАЛЬТОВЫМИ ВОЛОКНАМИ

Аннотация. В работе исследовано влияние базальтовых волокон на структуру и физико-механические свойства алюминиевого сплава АК7.Исследована структура и фазовый состав базальтовых волокон, которые состоят из оксидов железа, кремния, магния, кальция и др. Литьё позволило ввести базальтовые волокна в алюминиевый сплав АК7. Введение волокон базальта привело к увеличению твёрдости и механических свойств при растяжении сплава АК7.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, АК7, базальт, волокна, упрочнение, композиционный материал, металл, алюминий.

Abstract. This paper investigates the effect of basalt fibers on the physical and mechanical properties of the aluminum alloy АК7. It was found that with the introduction of 1.5 wt.% Basalt fibers, the microhardness increases from 68 HV to 82 HV, the width of the eutectic decreases from 12 to 7.5 μm.

Keywords: aluminum alloy, АК7, basalt, fibers, hardening, composite material, metal, aluminum.

Введение

Алюминий и его сплавы широко используются в автомобилестроении [1], авиастроении [2], строительстве [3], электротехнике [4], энергетике [5], и других отраслях. Но не смотря на обширность сфер применения алюминия, в настоящее время становится вопрос об увеличении его механических свойств. За последнее десятилетие появилось множество исследований по упрочнению алюминиевых сплавов различными керамическим микро- и наноразмерными волокнами и частицами, нанотрубками [6-9]. Введение керамических частиц позволяет увеличить прочностные и физико-механические свойства алюминиевых сплавов, такие как предел прочности, предел текучести, модуль упругости, за счёт различных механизмов распределения нагрузки [10].

Базальтовые волокна, впервые были получены в 60-х годах прошлого века в СССР для применения в аэрокосмической программе [11]. Интерес к базальтовым волокнам возник из-за следующих преимуществ: обширная сырьевая база, физико-механические характеристики, сравнимые с характеристиками высокомодульных стеклянных волокон, экологичность производства [12]. Начиная с конца прошлого века волокна из базальта стали применять в гражданских целях: армирование строительных конструкций, в тепло- и шумоизоляции и др. [13]. Последние исследования в применении базальта показывают заинтересованность учёных в синтезе композиционных материалов на основе алюминия и магния [14-16].

Производство базальтовых волокон с момента его получения в промышленных масштабах значительно улучшилось и является одностадийной технологией, что

Перспективным направлением применения базальтовых волокон является упрочнение ими лёгких сплавов с высоким содержанием кремния, т.к. в процессе синтеза композиционного материала происходит химическая реакция между упрочнителем и металлической матрицей. В результате на границе раздела фаз возможен синтез оксидной плёнки, обладающей высокими механическими характеристиками [17]. Высокая степень адгезии между базальтом и алюминием позволяет избежать предварительного растрескивания композиционного материала на границе раздела и, следовательно, достичь большего эффекта упрочнения при введении базальта. Граница раздела между базальтом и алюминиевой матрице исследована в работе [18].

Цель работы – получение и исследование влияния волокон базальта на структуру и физико-механические свойства алюминиевого сплава АК7.

Материалы и методы

В качестве исходных материалов для синтеза и исследования использованы литейный алюминиевый сплав АК7 системы Al-Si с химическим составом (Al – 90.4%, Si – 6.5-7.5%, Fe – 0.5%, Cu – 0.35%, Mg – 0.25-0.40%, Mn – 0.35%, Zn – 0.35%, Ti – 0.25%) и базальтовые волокна со средней длиной 56 мкм и диаметром 8 мкм.

Алюминиевый сплав АК7 массой 1,5 кг плавили в графитово-шамотном тигле при температуре 780°С. Перед введением в алюминиевый расплав базальт помещали в алюминиевую капсулу и нагревали в печи до температуры 200°С. После полного расплавления алюминия тигель с расплавом перемещался в печь открытого типа, где температура поддерживалась на уровне 730°С. Введение базальта сопровождалось механическим перемешиванием и производилось в зону перемешивания. После полного введения базальтовых волокон, перемешивания продолжалось в течении 30 секунд. Разливка расплава осуществлялась в стальной кокиль с одновременной вибрационной обработкой расплава до его кристаллизации. Содержание базальтовых волокон композиционном материале составило 1,5 масс.%. Исходный алюминиевый сплав АК7 был получен в аналогичных условиях без введения базальта.

Геометрических размеры волокон были получены методом лазерной дифракции на аппарате ANALYSETTE 22 MicroTec plus (FRITSCH, Gamburg, Germany). Микроструктура базальтового волокна, поверхности излома образцов и распределение базальта по объёму матрицы были исследованы с помощью растрового электронного микроскопа Quanta 200 3D. Химический состав базальта исследовался методом атомно-эмиссионного анализа на атомно-эмиссионном спектрометре с многоканальным анализатором эмиссионных спектров. Воздействие

высоких температур на базальтовые волокна исследовалось выдерживанием волокон в печи течении 15 минут при температуре 600°С. После воздействия высоких температур был проведён анализ химического состава методом атомно-эмиссионного спектрометра.

Плотность исходного сплава и получившегося композиционного материала была измеряна методом гидростатического взвешивания. Микроструктура композиционного материала изучена на оптическом микроскопе Olympus GX71 с предварительным электрохимическим травлением в 5-% растворе тетрафторборной кислоты. Микротвёрдость была измерена методом Виккерса с нагрузкой на индентор 50 граммов, а твёрдость измерялась методом Бринелля с индентором диаметром 2,5 мм и нагрузкой 62,5 кг.

Испытания на растяжение проводились с использованием универсальной электромеханической испытательной машины Instron3369 со скоростью движения траверсы 0,2 мм/мин.

Базальт

Проведённый фазовый анализ образцов показал, что в фазовом составе базальта преимущественно содержатся оксид кремния, оксид алюминия, оксид кальция и оксид железа. Результаты представлены в таблице 1. Воздействие высоких температур на волокна базальта не приводит к значительному изменению фазового состава, что свидетельствует об их стабильности в процессе литья и после него. Содержание серы в образцах базальта до и после отжига не превышает 0.03 масс.%.

Таблица 1 – Фазовый состав базальта

Базальт	SiO_2,%	Fe_2O_3,%	MgO,%	CaO,%	Na_2O,%	K_2O,%	TiO_2,%	P_2O_5,%	MnO,%	Al_2O_3,%	S,%
Исходный	43.39	11.30	2.89	22.39	3.68	0.94	1.52	0.53	0.22	13.71	0.01
После отжига	43.91	11.35	2.87	21.58	3.55	0.93	1.49	0.62	0.22	13.66	0.03

На рисунке 1 представлены РЭМ-изображения волокон базальта. Видно, что измельчённые базальтовые волокна имеют различные длину и диаметр. В порошке присутствуют крупные частицы, появившиеся, предположительно, из-за особенностей производства базальтового волокна, на котором сходное сырьё – базальтовую крошку – расплавляют в плавильной печи при температуре 1500°С. Расплавленная крошка подаётся на фильерную пластину, из которой вытекает в виде раздельных струек на раздувочное устройство, посредством гравитационных сил или под давлением сжатого воздуха [19]. На поверхности базальтовых волокон были обнаружены частицы со средним размером менее 1 мкм, которые являются следствием механического измельчения волокон.

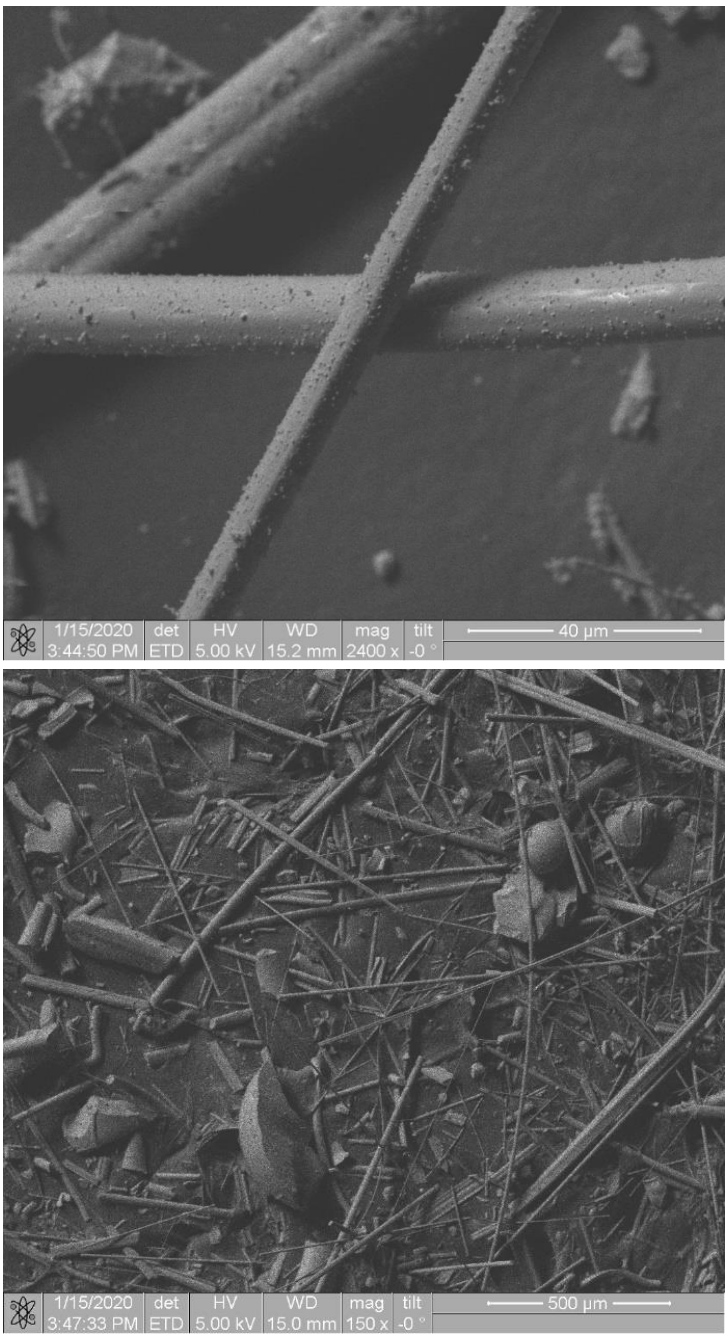
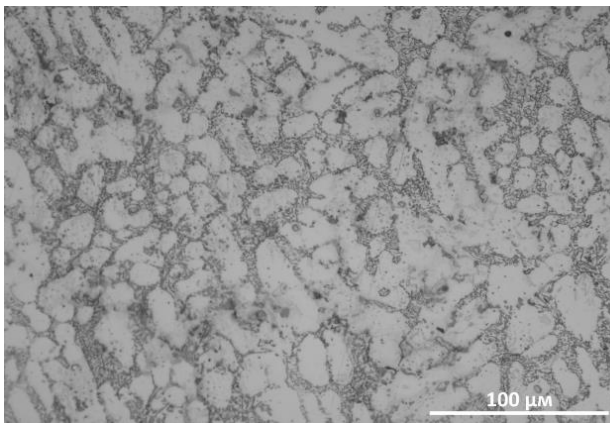


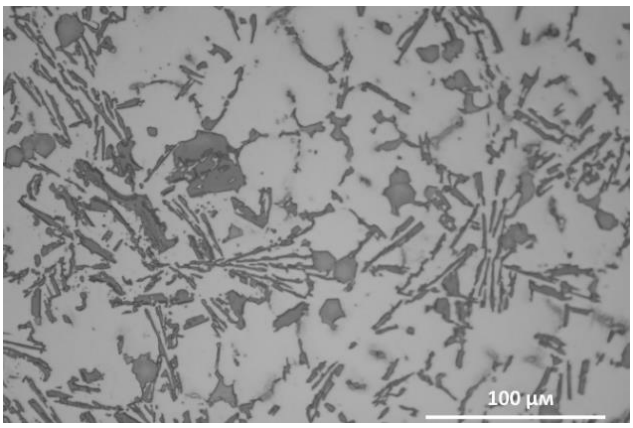
Рисунок 1 – РЭМ изображение волокон базальта.

Исследование геометрических размеров волокон выявило, что распределение имеет мультимодальный характер: большую часть составляют волокна со средним размером 56 мкм, что очевидно является длиной волокон. Множественные пики в диапазоне от 0,1 до 1 мкм объясняются различными возможными диаметрами волокон, что также подтверждается исследованиями растровой электронной микроскопии.

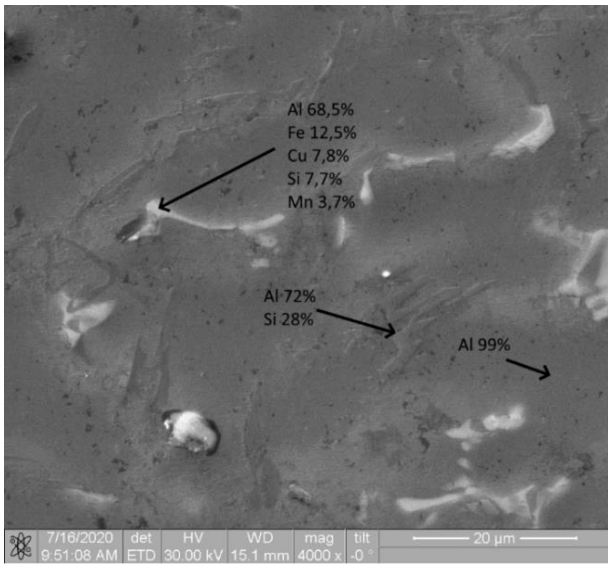
Структура композита

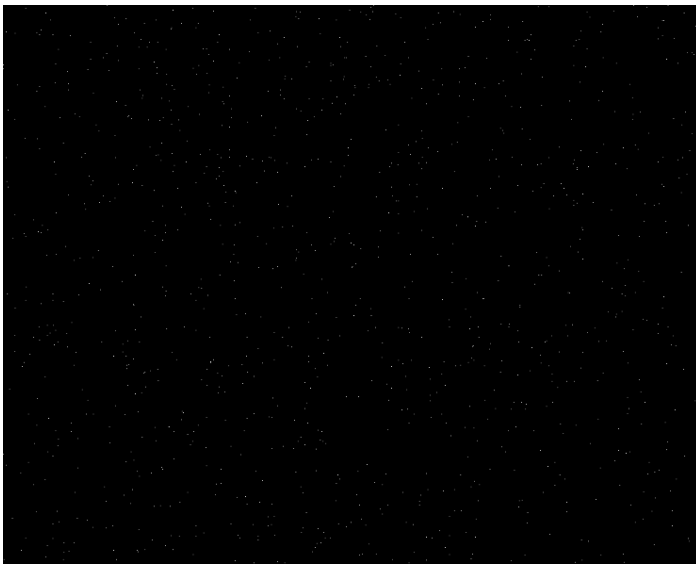
Исследования микроструктуры, методом оптической микроскопии (рисунок 2 а,б) показали, что структура исходного сплава АК7 представлена дендритами.





а б





в г

Рисунок 2- Оптические изображения микроструктуры сплавов
а) АК7; б) АК7 + 1,5 мас.% БВ; в) РЭМ-изображение поверхности композита АК7 + 1,5 мас.% БВ; г) картирование по кальцию поверхности композита АК7 + 1,5 мас.% БВ

Средний размер дендритной ячейки, рассчитанный методом случайных секущих, составил 19 мкм. Введение 1,5 мас.% базальтовых приводит к изменению микроструктуры: происходит переход от дендритной к зернистой (рисунок 2б), при этом средний размер зерна составил 32 мкм. Плотность полученного композиционного материала при введении 1,5 мас.% волокон составила 2,63 г/см3и сопоставима с плотностью алюминиевой матрицы, которая составила 2,68 г/см3.

Переход от дендритной структуры к бездендритной осуществляется за счёт того, что введение 1,5 мас.% базальта становится достаточно для сдерживания роста зёрен в процессе кристаллизации расплава. При этом, исследование структуры методами оптической микроскопии не позволяет точно распознать волокна базальта в структуре алюминиевой матрицы. Исследование микроструктуры

композиционного материала с использованием электронной микроскопии, рисунок 2в, показало, что структура представлена алюминиевой матрицей, твёрдым раствором Al-Si и эвтектикой кремния. По результатам исследования также видно, что в зоне кремниевой эвтектики наблюдается высокая концентрация железа, алюминия, марганца и др. Это может косвенно свидетельствовать о наличии волокон базальта в эвтектической зоне алюминиевого матрицы. По данным картирования по элементам образца композиционного материал АК7-1,5% базальта, рисунок 2г, наибольшее количество элементов, входящих в химический состав базальтов сконцентрировано в эвтектических включениях кремния.

Механические свойства композита

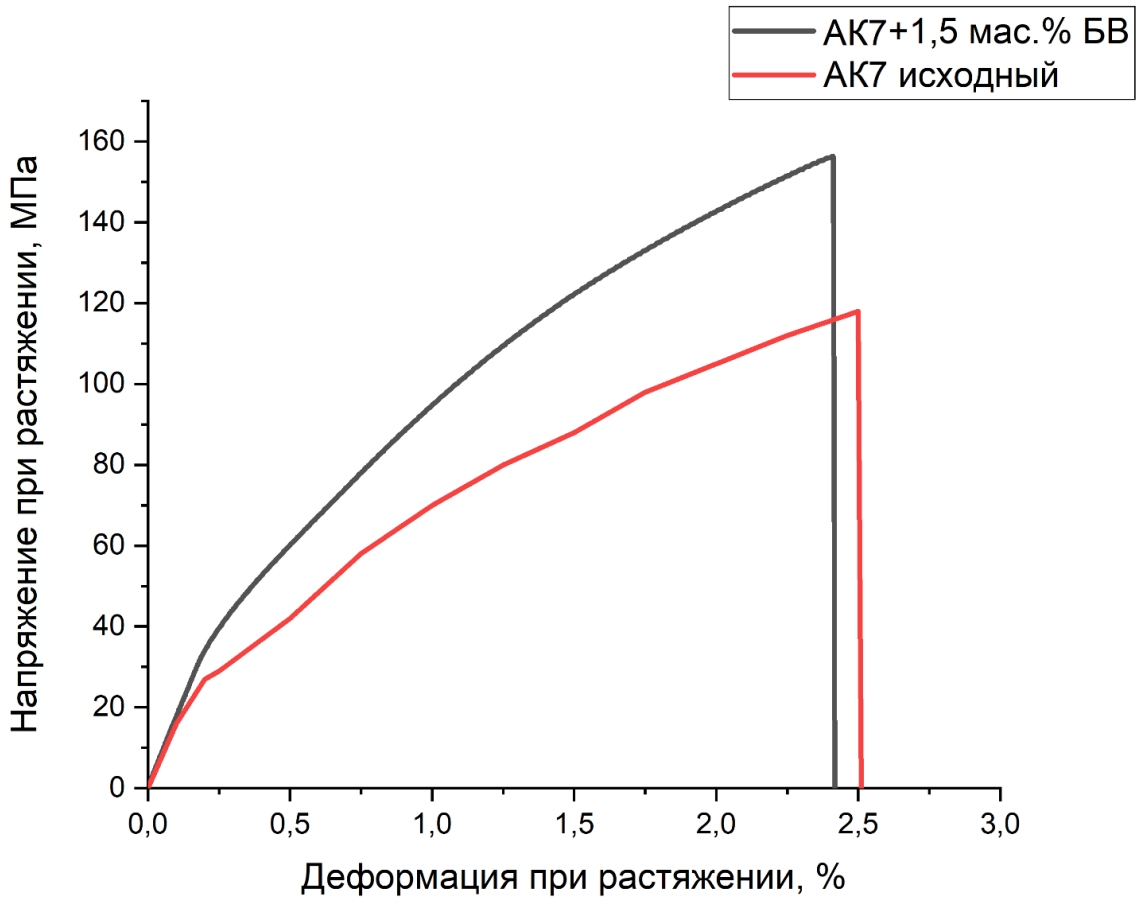
Результаты испытаний на одноосное растяжения композиционного материала АК7+1,5% мас. базальтовых волокон показаны на рисунке 3а в таблице 2.

Таблица 2 – Механические свойства полученных материалов

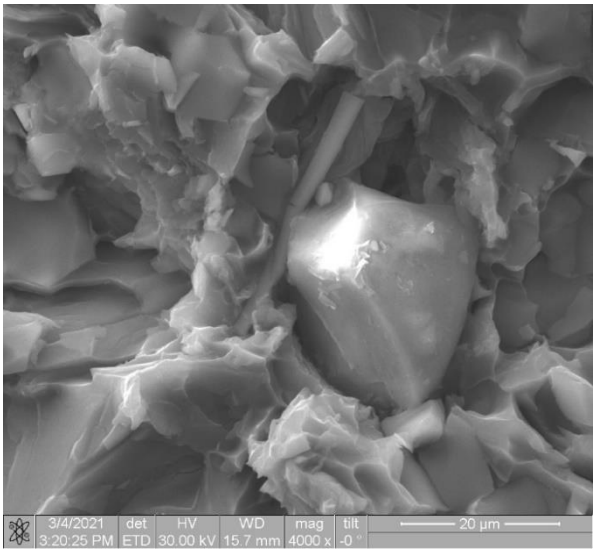
Образец	Микротвёрдость по методу Виккерса, HV	Твёрдость по методу Бринелля, HB	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Деформация, %
АК7	68±1	71±0,8	18±1,5	118±11,2	2,5±0,05
АК7+1,5 % БВ	92±1,1	95±1	30±2,1	156±12	2,4±0,04

Из диаграммы растяжения видно, что введение 1,5 мас.% базальта привело к увеличению предела текучести сплава АК7 с 18 МПа до 30 МПа, а предел прочности увеличился с 118 МПа до 156 МПа, пластичность незначительно уменьшилась с 2,5 до 2,4% . Увеличение предела прочности обусловлено вкладом базальтовых волокно, которые позволяют формировать каркасную зеренную структуру композиционного материала, как было показано на рисунке 2.

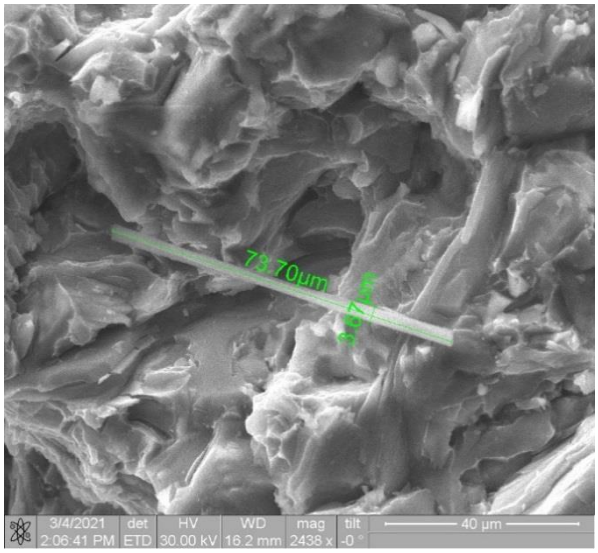
Исследование поверхностей разрушения образцов композиционных материалов АК7 + 1,5 мас.% (рисунок 3 б,в) базальта показали наличие базальтовых волокон, форма и размер которых не изменяются в процессе литья. Видно, что разрушение происходит по смешанному механизму. Волокна базальта разрушаются хрупко под действием нагрузки, как показано на рисунке 3б. Кроме этого в процессе деформации происходит выкрашивание крупных волокон базальта из алюминиевой матрицы, что может свидетельствовать о недостаточной адгезии на границе раздела волокно-матрица. Оптимизация процесса подготовки порошка, содержащего волокна базальта и процесса обработки внешними воздействиями должна повысить смачиваемость поверхности базальта и увеличения адгезии.



а)



б)



в)

Рисунок 3 – а) диаграмма одноосного растяжения композиционного материала АК7+1,5 мас.% базальта; б,в) поверхности разрушения композита АК73+1,5 мас.% базальта

Исследования микротвёрдости показали, что при введении 1,5 мас.% волокон значение увеличивается на 35% в сравнении с исходным сплавом. Результаты измерения твёрдости показали, что введение 1,5 мас.% базальта увеличивает значение величины твёрдости с 71 до 95 HB.

Заключение

Установлено, что литьё позволяет ввести и распределить базальтовые волокна в расплаве алюминиевого сплава АК7.

Установлено, что введение базальта приводит к повышению механических свойств алюминиевого сплава АК7. Введение 1,5 мас.% базальта приводит к увеличению микротвёрдости с 68 до 92 HV, твёрдости со 71 до 95 HB, а также позволяет увеличить предел текучести, предел прочности с 18 до 30 МПа и с 118 до 156 МПа

Установлено, что на поверхности разрушения присутствуют волокна базальта, которые разрушаются по хрупкому механизму. При этом в процессе деформации происходит их выкрашивание из-за недостаточной адгезии между матрицей и поверхностью базальта.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-13-01252).

Библиографический список

1. Poznak A. Automotive Wrought Aluminium Alloys / Poznak A., Freiberg D., Sanders P. // Fundamentals of Aluminium Metallurgy. – Woodhead Publishing, 2018. – С. 333-386.
2. Aluminium alloys for aerospace applications / Rambabu P. [et al.] // Aerospace materials and material technologies. – Springer, Singapore, 2017. – С. 29-52
3. Wijesekara D. M. Cost effective and speedy construction for high-rise buildings in Sri Lanka by using aluminium panel system formworks. – 2012.
4. Joel I. An aluminium superinductor / Joel I., Wang J., Oliver W. D. // Nature materials. – 2019. – Т. 18. – №. 8. – С. 775.
5. An ultrafast rechargeable aluminium-ion battery / Lin M. C. [et al.] // Nature. – 2015. – Т. 520. – №. 7547. – С. 324-328.
6. Investigation of mechanical properties and dry sliding wear behaviour of squeeze cast LM6 aluminium alloy reinforced with copper coated short steel fibers / Chelladurai S. J. S. [et al] // Transactions of the Indian Institute of Metals. – 2018. – Т. 71. – №. 4. – С. 813-822.
7. A method for introduction of Al2O3 nanofiber into aluminum alloy / Chen Y. [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – Т. 347. – №. 1. – С. 012050.

8. Физико-механические и электрические свойства литых сплавов на основе алюминия, упрочненных наночастицами алмаза /С.А. Ворожцов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Физика, – 2014., – Т. 57, – № 11, – С. 31-36
9. Influence the carbon nanotubes on the structure and mechanical properties of aluminum-based metal matrix composites / Vorozhtsov S. [et al] //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2016. – Т. 1772. – №. 1. – С. 030021.
10. Advanced metal matrix nanocomposites / Malaki M. [et al.] //Metals. – 2019. – Т. 9. – №. 3. – С. 330.
11. Colombo C. Static and fatigue characterisation of new basalt fibre reinforced composites / Colombo C., Vergani L., Burman M. // Composite structures. – 2012. – Т. 94. – №. 3. – С. 1165-1174.
12. Militky J. Ultimate mechanical properties of basalt filaments / Militky J., Kovacic V. // Textile Research Journal. – 1996. – Т. 66. – №. 4. – С. 225-229.
13. Mineral fibres: basalt / Wu Z. [et al.] //Handbook of Natural Fibres. – Woodhead Publishing, 2020. – С. 433-502
14. Investigation on mechanical properties and failure mechanisms of basalt fiber reinforced aluminum matrix composites under different loading conditions / Zhiming Y. [et al.] // Journal of Composite Materials. – 2018. – Т. 52. – №. 14. – С. 1907-1914;
15. Reddy S. S.. Effect of fly ash and basalt on wrought and cast aluminum alloy / Reddy S. S., Dhanasekaran R. // Materials Today: Proceedings. – 2018. – Т. 5. – №. 13. – С. 27112-27117;
16. Basalt fibre reinforced aluminium matrix composites–A review / Abraham C. B. [et al.] //Materials Today: Proceedings. – 2020. – Т. 21. – С. 380-383
17. Fibre/matrix intermetallic phase formation in novel aluminium-basalt composites. / O Adole [et al.] // Materials Letters. – 2019 . – Т. 239, – С. 128-131;
18. Microstructures and mechanical properties of BP/7A04 Al matrix composites / Fan C. [et al.] //Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2019. – Т. 29. – №. 10. – С. 2027-2034
19. Mineral fibres: basalt / Wu Z. et al. //Handbook of Natural Fibres. – Woodhead Publishing, 2020. – С. 433-502.

УДК 544.163.3

*Эстемирова С.Х., Митрофанов В.Я., Черепанова Л.А.**

СТРУКТУРНЫЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДОГО РАСТВОРА $TM_{2-x}MN_xO_3$ С ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ

Аннотация. Кристаллическая структура и магнитные свойства твердого раствора $Tm_{2-x}MnxO_3$ с гексагональной кристаллической структурой исследованы методами рентгеновской дифракции и магнетометрии. Образование составов с избытком Tm осуществляется по типу вакансий в подрешетке Mn. Образование составов с избытком Mn сопровождается реакцией диспропорционирования: $2Mn^{3+}=Mn^{4+}+Mn^{2+}$, и последующим заселением Mn^{2+} узлов Tm. Для всех исследуемых образцов имеет место переход в антиферромагнитное состояние при T_N~80 K. Для соединений составов x=0.96, 1.06 обнаружен дополнительный магнитный фазовый переход при T*~40 K.

Ключевые слова: гексагональные манганиты рездкоземельных элементов, кристаллическая структура, магнитные свойства.

Abstract. The crystal structure and magnetic properties of solid soTmtion $Tm_{2-x}MnxO_3$ with a hexagonal crystal structure have been studied by X-ray diffraction and magnetometry The formation of compounds with an excess of Tm is carried out by way of formation of vacancies in the manganese sublattice. The formation of compositions with an excess of Mn is accompanied by a disproportionation reaction: $2Mn^{3+}=Mn^{4+}+Mn^{2+}$ and subsequent occupation of Mn^{2+} Tm sites. All investigated compositions demonstrate a phase transition to an antiferromagnetic state at a T_N~80 K. For compounds with compositions x = 0.96, 1.06, we found an additional magnetic phase transition at T*~40 K.

Keywords: hexagonal manganites of rare earth elements, crystal structure, magnetic properties.

Введение

Гексагональные манганиты редкоземельных (РЗ) элементов являются мультиферроиками – материалами, в которых сосуществуют одновременно два и более типов «ферро» упорядочения: ферромагнитное, сегнетоэлектрическое, сегнетоэластичное [1, 2]. Благодаря взаимосвязи магнитной и электрической подсистем предоставляется возможность управлять магнитными свойствами с помощью электрического поля и наоборот. Это предполагает их широкое применение в электронике.

В гексагональной структуре кристаллизуются манганиты редкоземельных элементов с большими порядковыми номерами, начиная с Ho (Ho, Er, Tm, Yb, Tm, Lu) а также Sc и Y. Образование гексагональной структуры (пространственная группа $P6_3cm$) связано с малой величиной ионных радиусов РЗ-ионов и наличием ковалентных связей Mn-O из-за возникновения $3d^4sp^3$-гибридных орбит. Основным мотивом структуры является треугольная бипирамида [3]. Соединяясь вершинами, бипирамиды образуют слои, перпендикулярные к оси шестого порядка. Ионы

марганца находятся внутри бипирамид, а РЗ- ионы располагаются между их слоями (Рисунок 1).

Кристаллическая структура гексагональных $LnMnO_3$ (Ln=Ho-Lu, Sc, Y) имеет два основных отличия от перовскитоподных манганитов с малыми порядковыми номерами РЗ. Во-первых, поскольку ионы Mn^{3+} (в высокоспиновом $3d^4$ состоянии) расположены в центре тригональной бипирамиды, а не в октаэдре, кристаллическое поле расщепляет 3d уровень на три энергетические уровня так, что Mn^{3+} $3d^4$ не имеет частично заполненных вырожденных уровней и поэтому ион Mn^{3+} не является Ян-Теллеровским активным центром. Расчеты плотности состояний показывают некоторую гибридизацию уровней Mn 3d и O 2p [3]. Во-вторых, бипирамиды MnO_5 соединены по углам в некие «листы», разделенные слоем ионов Ln (2D-сеть). Это контрастирует с 3D-сетью MnO_6 в перовскитовых манганитах. В результате гексагональные h-LnMnO3 являются псевдослойными.

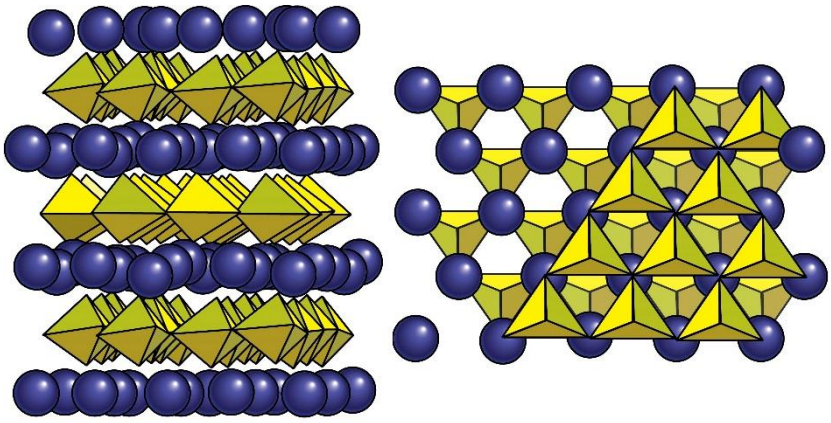


Рисунок 1 – Воспроизведение рис. 1 из [3] со схематическим изображением структуры h-$TmMnO_3$; слева – вид в базисной плоскости; темные сферы – Tm; тригональные бипирамиды – MnO_5; справа – вид по оси *c* двух слоев бипирамид.

Гексагональные манганиты h-$LnMnO_3$ могут проявлять восемь различных типов треугольного антиферромагнитного упорядочения спинов Mn^{3+} в базисной плоскости *xy* и коллинеарного упорядочения ионов Ln^{3+} с частично заполненной 4f-оболочкой вдоль гексагональной ось *z*. Фазовые переходы в подрешетках Mn^{3+} могут индуцироваться температурой или внешним магнитным полем [1]. Они сопровождаются синфазным или противофазным вращением спинов в соседних плоскостях по оси z. Магнитный порядок обусловлен доминирующим антиферромагнитным сверхобменным взаимодействием в плоскости Mn-O-Mn, дополненным межплоскостным Mn-O-O-Mn обменом в треугольной решетке, который является на два порядка слабее указанного выше сверхобменного. Ниже T_N

сильный сверхобмен приводит к упорядочению спинов Mn^{3+} направленными под углом 120° друг к другу в базисной плоскости.

Магнитными, электрическими и др. свойствами манганитов можно управлять, изменяя их химический состав. Большое разнообразие магнитных фазовых превращений происходит при замещении иона Ln^{3+} на двухвалентные ионы, например, Ca^{2+}, Sr^{2+} [4]. Радикальное изменение свойств при таком типе замещений связано с переходом части ионов Mn^{3+} в четырехвалентное состояние. Однако свойства манганитов можно изменять и без участия двухвалентных допантов, а за счет создания нестехиометрии по анионам или катионам.

В данной работе исследовались структурные и магнитный свойства твердого раствора $Tm_{2-x}Mn_xO_3$. Для исследования были выбраны составы, обогащенные Tm или Mn, а также стехиометрическое соединение $TmMnO_3$ в соответствии с областью гомогенности гексагонального манганита тулия на фазовой диаграмме [5].

Образцы и методика эксперимента

Поликристаллические образцы $Tm_{2-x}Mn_xO_3$ (x=0.96, 0.98, 1, 1.02, 1.04, 1.06) были синтезированы по керамической технологии из оксидов Tm_2O_3 и Mn_2O_3 (чистота 99.9 %). Стехиометрические смеси оксидов гомогенизировали в среде этилового спирта в планетарной мельнице с гарнитурой из оксида циркония. Смеси прессовали в таблетки и обжигали на воздухе при 1400 °C. Во избежание получения метастабильных состояний, а также для формирования хорошо окристаллизованного материала, отжиг образцов проводился длительное время (до 270 часов) с промежуточным размолом через каждые 90 часов отжига. Синтез завершался охлаждением до комнатной температуры отожженных образцов внутри печи.

Рентгеновский дифракционный анализ полученных образцов выполнен на дифрактометре Shimadzu XRD-700 (CuK_α-излучение, графитовый монохроматор, шаг съемки $\Delta(2\theta)$=0.02 °, интервал углов рассеяния 2θ=20-90 °). Рентгенофазовый анализ выполнен с помощью международной картотеки ICDD PDF-2. Расчет структурных параметров проводили методом Ритвельда с помощью программного комплекса GSAS, в качестве стартовой модели использовали данные [6].

Магнитные измерения проводились на магнетометре Cryogenic CFS-9T-CVTI в области температур 4-300 К. Температурные зависимости намагниченности m(T) получены в режиме предварительного охлаждения в нулевом магнитном поле (ZFC) и в поле 100 Э (FC). Изотермические зависимости намагниченности от магнитного поля m(H) измерялись при фиксированных температурах в диапазоне от 0 до ±20 кЭ.

Результаты и обсуждение

Рентгеновский дифракционный анализ показал, что в стехиометрическом составе $TmMnO_3$, а также в составах с избытком марганца (x=1.0, 0.98, 0.96, 0.94) формируется однофазный материал, представляющий собой твердый раствор $Tm_{2-x}Mn_xO_3$ с гексагональной структурой, пространственная группа *P6₃cm*. На рисунке 2 выборочно показаны дифрактограммы для стехиометричного состава $TmMnO_3$, состава с избытком Tm (верхняя дифрактограмма), содержащего примесь Tm_2O_3, и однофазного состава с избытком марганца.

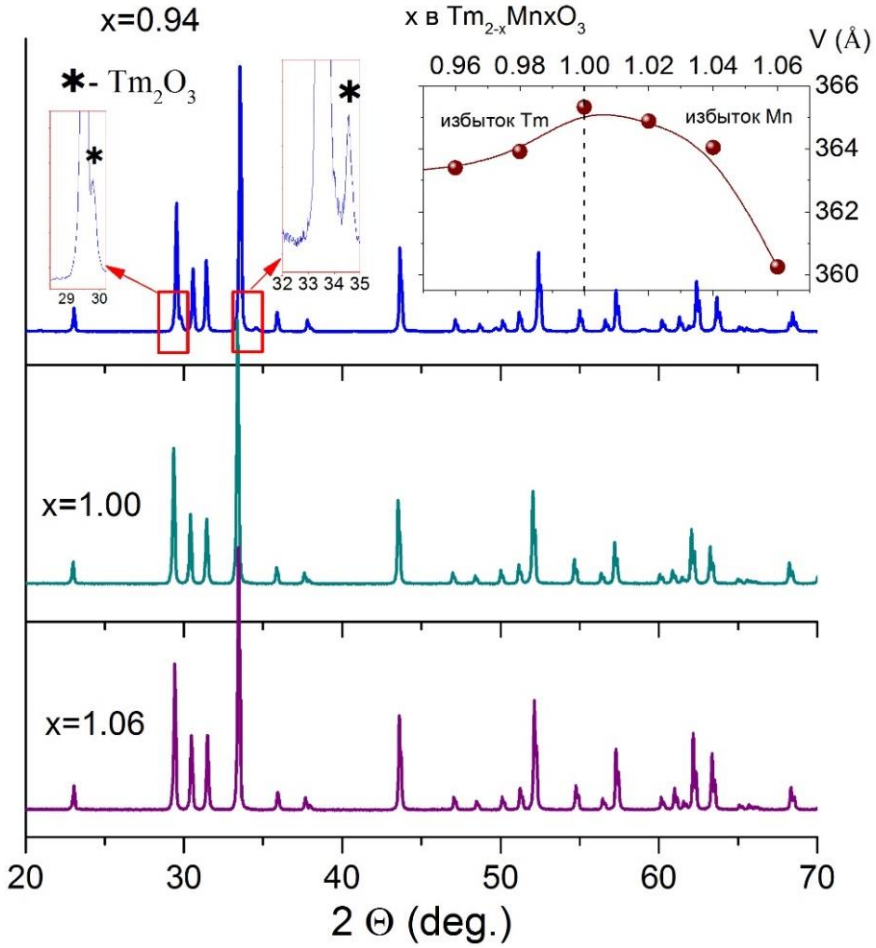


Рисунок 2 – Дифрактограммы составов $Tm_{2-x}Mn_xO_3$ (x=0.94, 1.00, 1.06); на вставке показана концентрационная зависимость объема элементарной ячейки (V) гексагонального манганита $Tm_{2-x}Mn_xO_3$.

Гексагональная элементарная ячейка манганита тулия содержит шесть формульных единиц; решетка имеет семь неэквивалентных позиций с десятью уточняемыми параметрами. Параметры элементарной ячейки и координаты атомов всех составов, а также фазовый состав представлены в таблице 1.

В составах с избытком Tm наблюдается выделение примесной фазы оксида тулия (Рисунок 2). В составе с x=1.02 содержание Tm_2O_3 фиксируется в виде следовых количеств. По мере увеличения Tm, содержание оксида Tm_2O_3 возрастает и в составе x=0.96 его количество достигает 3 масс.%. В таблице 1 представлены

результаты расчета параметров кристаллической структуры и фазовый состав образцов.

Концентрационная зависимость объема элементарной ячейки, представленная на вставке рисунка 2, наглядно подтверждает, что в гексагональной структуре растворяется небольшое избыточное количество Tm, и гораздо большее количество избыточного марганца.

Таблица 1 – Параметры элементарной ячейки и координаты атомов тулия, марганца и кислорода в гексагональном $Tm_{2-x}Mn_xO_3$

ПЭЯ	x в $Tm_{2-x}Mn_xO_3$						
	1.06	1.04	1.02	1	0.98	0.96	0.94
a, Å	6.046	6.08060	6.086	6.087	6.080	6.075	6.075
c, Å	11.386	11.371	11.383	11.392	11.368	11.367	11.37
V, $Å^3$	360.36	364.02	365.09	365.57	363.88	363.30	363.25
Tm(1) z	0.2886	0.288	0.2846	0.283	0.288	0.286	0.2908
Tm(2) z	0.2434	0.246	0.2409	0.241	0.245	0.243	0.2478
Mn x	0.333	0.333	0.334	0.343	0.330	0.333	0.336
O(1) x	0.294	0.305	0.293	0.303	0.302	0.300	0.285
O(1) z	0.162	0.160	0.169	0.158	0.166	0.162	0.166
O(2) x	0.642	0.633	0.649	0.644	0.630	0.644	0.640
O(2) z	0.329	0.329	0.335	0.328	0.337	0.331	0.338
O(3) z	0.508	0.499	0.490	0.479	0.470	0.493	0.507
O(4)z	0.044	0.035	0.031	0.023	0.016	0.037	0.043
χ^2	8	5.2	6.2	4.0	4.6	4.6	4.7
Содержание примеси (мас.%)	-	-	-	-	<1% Tm_2O_3	~2% Tm_2O_3	~3% Tm_2O_3

Возможный механизм растворения избыточного количества Tm в структуре манганита – образование твёрдого раствора вычитания, который возникает за счет появления в кристаллической решетке вакантных узлов Mn. Из экспериментальных данных очевидно, что предел растворимости Tm в данной структуре небольшой и находится вблизи состава $Tm_{1.02}Mn_{0.98}O_3$. Уменьшение объема элементарной ячейки в составах с избытком Tm может быть связано с тем, что радиус вакансий марганца немного меньше радиуса ионов марганца. Кристаллохимическая формула в этом случае имеет вид:

$$Tm_{1+x}Mn_{1-x}V_x^{Mn}O_3,$$

где V_x^{Mn} – вакансия в подрешетке Mn.

Из таблицы 1 и концентрационной зависимости объема элементарной ячейки, представленной на вставке рисунка 2, хорошо видно, что, по сравнению с Tm, марганец обладает гораздо более высокой растворимостью в кристаллической структуре $TmMnO_3$. В основе механизма высокой растворимости лежит природа марганца, как металла с переменной валентностью. Для перовскитоподобных манганитов установлено, что в кристаллической структуре реализуется три валентных состояния марганца: Mn^{2+}, Mn^{3+} и Mn^{4+}, то есть происходит зарядовое диспропорционирование трехвалентного марганца по реакции: $2Mn^{3+}=Mn^{4+}+Mn^{2+}$ [7]. При этом двухвалентный марганец, в силу его относительно большого ионного радиуса (сопоставимого с радиусом редкоземельного иона) занимает кубооктаэдрические позиции перовскитоподобной структуры.

Очевидно, что такая же ситуация реализуется и в гексагональных манганитах. Кристаллохимическая формула Tm-дефицитного манганита $Tm_{1-x}MnO_3$ (в пересчете на 1 моль Mn) имеет следующий вид:

$$(Tm^{3+}_{1-x}Mn^{2+}_{x/2})(Mn^{3+}\ Mn^{4+}_{x/2})O_3.$$

Следовательно, двухвалентный марганец в структуре Tm-дефицитного манганита играет ту же роль, что и катион щелочноземельного элемента в структуре легированных манганитов $Ln_{1-x}Me_xO_3$ (Me=Ca, Sr, Ba), т.е. повышает степень окисления марганца, находящегося в своих позициях до состояния 4+. Эффективные радиусы разновалентных ионов марганца в пятикратном окружении равны 0.560 Å и 0.460 Å для Mn^{3+} и Mn^{4+} соответственно [8]. Согласно правилу Вегарда, уменьшение среднего радиуса структурных единиц в кристаллографических позициях влечет за собой уменьшение параметров кристаллической структуры. В соответствии с этим правилом мы наблюдаем закономерное уменьшение объема элементарной ячейки с увеличением избытка марганца.

Магнитные свойства манганита тулия $TmMnO_3$ во многом похожи на магнитные свойства манганитов его ближайших соседей по редкоземельному ряду: $ErMnO_3$ и $YbMnO_3$ [9]. Магнитная фазовая диаграмма манганита $TmMnO_3$ аналогична фазовым диаграммам $ErMnO_3$ и $YbMnO_3$, за исключением того, что упорядочение магнитного момента редкоземельного элемента не наблюдается при температурах выше 1.8 К.

Магнитные измерения были выполнены для образцов $Tm_{2-x}Mn_xO_3$ (x=0.96, 1.00, 1.02, 1.04). Температурные зависимости ZFC и FC намагниченностей m образцов $Tm_{2-x}Mn_xO_3$ при H =100 Э магнитного поля приведены на рисунке 3.

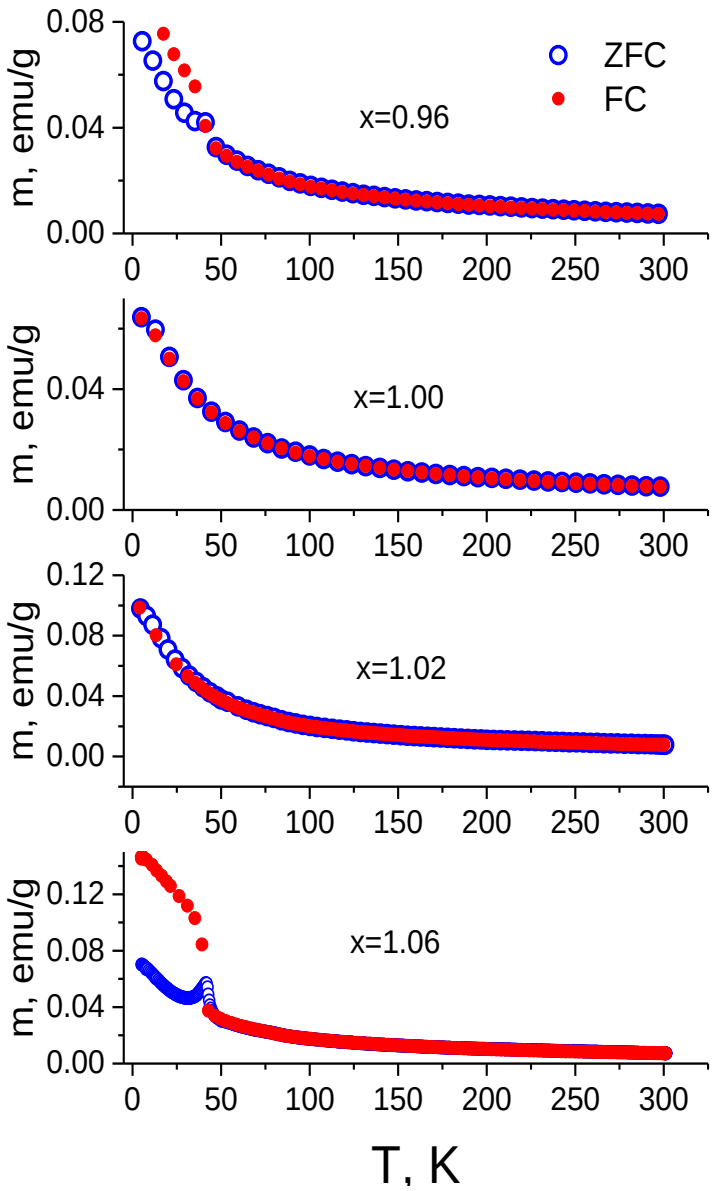


Рисунок 3 – Температурные зависимости ZFC и FC намагниченностей исходного образца $Tm_{2-x}Mn_xO_3$ (x=0.96, 1.00, 1.02, 1.06) в магнитном поле H=100 Э.

Для составов с x=1.00, 1.02 кривые ZFC и FC практически совпадают между собой во всем измеряемом интервале температур. Эти кривые демонстрируют кюри-вейссовские подобные профили без видимого магнитного перехода вблизи T_N~80 K. Одним из объяснений подобного поведения является то, что эти переходы маскируются за счет парамагнетизма Tm^{3+} (эффективный парамагнитный момент μ_{eff}=7.6 μ_B). Аналогичное поведение ZFC и FC кривых наблюдается также в манганитах $YbMnO_3$, $HoMnO_3$, $ErMnO_3$ [10]. С другой стороны, для составов с x=1.02, 1.06 необратимость ZFC и FC кривых наступает при T<50 K, которая явно свидетельствует о наличие магнитного фазового превращения.

Анализ первой производной dm/dT выявил три особенности при температурах порядка 17 K, 40 K и 80 K. Полученные результаты представлены в таблице 2.

Аномалии на кривой *dm*/*dT* при *T*~80 K, соответствующие переходу из парамагнитного в антиферромагнитное состояние, надежно фиксировались для составов с x=1.02, 1.06. Крайне неожиданным результатом явилась однозначная фиксация магнитного перехода в стехиометрическом составе $TmMnO_3$ при *T* = 17 K, который ранее в литературе не был отмечен. Магнитный фазовый переход при (41÷43) K наблюдается только для $Tm_{2-x}Mn_xO_3$ (x=0.96, 1.06).

Таблица 2 – Температуры магнитных фазовых переходов в твердом растворе $Tm_{2-x}Mn_xO_3$.

Состав	T_N, K	T_a, K	θ, K	μ,
TmMnO3	90	15	-50	8.51
$Tm_{1.04}Mn_{0.96}O_3$	43.5 (m*T) 44.5 (1/m) 83 (1/m 2T) 83(m*T 2T)	17 (FCW 2T)	-41	8,33
$Tm_{0.98}Mn_{1.02}O_3$	84 (o.c.) 84 (1/m ZFC)	16 (ZFC)	-25	8.20
$Tm_{0.94}Mn_{1.06}O_3$	43 (m ZFC) 82(1/m ZFC)	-	-43	8,15

Естественно, возникает вопрос о происхождении перехода при *T*~40 K, который согласно таблице 2 имеет место для образцов с x =0.96, 1.06. Здесь следует отметить, что, согласно литературным данным в окрестности *T*~40 K наблюдаются переходы для следующих соединений: переход в ферримагнитное состояние оксида Mn_3O_4; переход в несоизмеримую АФМ фазу в орторомбическом o-$TmMnO_3$; переход в двумерную модулированную несоизмеримую магнитную фазу в $TmMn_2O_5$ [11]. При x<1 только o-$TmMnO_3$ может отвечать за этот переход, а при x>1 наиболее вероятными являются переходы в соединениях Mn_3O_4 и $TmMn_2O_5$. Однако в наших нестехиометрических составах рентгенографически не фиксируется примесных фаз Mn_3O_4 и $TmMn_2O_5$, а получение орторомбической фазы o-$TmMnO_3$ требует высоких давлений. К тому же зависимость намагниченности от магнитного поля для всех образцов является практически линейной аналогично той, которая наблюдается для гексагональной *h*-$TmMnO_3$ в [11, 12]. Поэтому с большой вероятностью можно утверждать, что исследуемые образцы являются однофазными, а переход при *T*~ 40 K внутренне присущ нестехиометрическим составам с симметричными значениями избытка Tm или Mn относительно стехиометричного манганита $TmMnO_3$. Вопрос о происхождении перехода при T =(16÷18) K также остается открытым.

Заключение

Таким образом, показано, что твердые растворы с гексагональной структурой $Tm_{2-x}Mn_xO_3$ имеют узкую область гомогенности со стороны составов с избытком Tm и широкую – со стороны избытка Mn. Составы с избытком Tm образуют твердые растворы вычитания с образованием вакансий в кристаллографических узлах марганца. Составы с избыточным количеством Mn образуют твердые растворы замещения, в кристаллической структуре которых вакантные узлы Tm заселены двухвалентными ионами марганца, а в кристаллографических позициях марганца находятся статистически распределенные разновалентные ионы Mn^{3+} и Mn^{4+}.

Магнитные измерения показали, что для всех исследуемых образцов имеет место переход из парамагнитного в антиферромагнитное состояние при T_N~80 K. Магнитное поведение для стехиометрического состава $TmMnO_3$, а также для состава с небольшим избытком марганца (x=1.02) соответствует литературным данным для $TmMnO_3$ [11, 12]. Для соединений с избытком тулия и с большим избытком марганца (x=0.96, 1.06) обнаружен дополнительный магнитный фазовый переход при T^* ~40 K. Вопрос о происхождении этого перехода требует дополнительного исследования.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМЕТ УрО РАН на оборудовании центра коллективного пользования «Урал-М».

Библиографический список

1. Fiebig M. Spin-rotation phenomena and magnetic phase diagrams of hexagonal $RMnO_3$ / M. Fiebig, Th. Lottermoser, R. V. Pisarev. – DOI 10.1063/1.1544513 // Journal of Applied Physics. – 2003. – Vol. 93. – P. 8194–8196.
2. Hexagonal manganites: Strong coupling of ferroelectricity and magnetic orders / B. Lorenz. – DOI 10.1515/psr-2019-0014 // Physical Sciences Reviews. – 2019. –Vol. 4, Iss. 19. – P. 20190014.
3. Aken B. B. Van. Hexagonal $TmMnO_3$ revisited / B. B. Van Aken, A. Meetsma, T. T. M. Palstra. – Hexagonal $TmMnO_3$ revisited / B. B. van Aken, A. Meetsma, T. T. M. Palstra. – DOI 10.1107/S1600536801015094 // Acta Crystallographica. – 2001. – Vol. 57, Iss. 11. – P. I101–I103.
4. Nagaev E. L. Colossal-magnetoresistance materials: manganites and conventional ferromagnetic semiconductors / E. L. Nagaev. – DOI 10.1016/S0370-1573(00)00111-3 // Physics Reports. – 2001. – Vol. 346, Iss. 6. – P. 387–531.
5. Федорова О. М. Область гомогенности твердого раствора $Tm_{2-x}Mn_xO_{3\pm\delta}$ на воздухе / О. М. Федорова, Ю. В. Голиков // Журнал физической химии. – 2001. – Т. 85, № 12. – С. 2398–2400.
6. Characterization of $RMnO_3$ (R = Sc, Y, Dy-Tm): High-pressure synthesized metastable perovskites and their hexagonal precursor phases / K. Uusi-Esko. – DOI

10.1016/J.MATCHEMPHYS.2008.07.009 // Materials Chemistry and Physics. – 2008. – Vol. 112, Iss. 3. – P. 1029–1034.
7. Roosmalen Van J. A. M. Defect Chemistry of $LaMnO_{3\pm\delta}$ 4. Defect Model for $LaMnO_{3\pm\delta}$ / J. A. M. Van Roosmalen, E. H. P. Cordfunke. – DOI 10.1006/JSSC.1994.1143 // Journal of Solid State Chemistry. – 1994. – Vol. 110, Iss. 1. – P.109–112.
8. Shanon R. D. Revised Effective Ionic Radii and Systematic of Interatomic Distances 0n Halides and Chalcogenides / R. D. Shanon. – DOI 10.1107/S0567739476001551 // Acta Crystallography. – 1976. – Vol. A32, – P. 751–767.
9. Yen F. Magnetic phase diagrams of multiferroic hexagonal $RMnO_3$ (R = Er, Yb, Tm, and Ho) / F. Yen, C. dela Cruz, B. Lorenz [et al.]. – DOI 10.1557/jmr.2007.0271 // Journal of Materials Research. – 2007. –Vol. 22. – P. 2163–2173.
10. Yoshii K. Magnetic Properties of $LnMnO_3$ (*Ln*=Ho, Er, Tm, Yb, and Tm) H. / K. Yoshii, H. Abe Abe. – DOI 10.1006/JSSC.2001.9514 // Journal of Solid State Chemistry. – 2002. – Vol. 165, Iss. 1. – P. 131–135.
11. Neutron Diffraction Study of Magnetic Ordering Associated with Ferroelectricity in $TmMn_2O_5$ / S. Kobayashi, H. Kimura, Y. Noda, K. Kohn. – DOI 10.1143/JPSJ.74.468 // Journal of the Physical Society of Japan. – 2005. – Vol. 74. – P. 468–472.
12. Salama H. A. Exchange-induced Tm magnetism in multiferroic h-$TmMnO_3$ / H. A Salama, G. A. Stewart. – DOI 10.1088/0953-8984/21/38/386001 // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2009. – Vol. 21, Iss. 38. – P. 386001.

УДК 378.14

Сун. Г., Решетникова О.Е., Дайнеко Л.В.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫНУЖДЕННОГО ПЕРЕХОДА НА ДИСТАНЦИОННОЕ ОБУЧЕНИЕ ГЛАЗАМИ СТУДЕНТОВ

Аннотация. 2020 год был годом вызова для всей системы образования, как в России, так и в мире. Вынужденный полный переход на дистанционное обучение оказался сложным и для преподавателей, и для студентов. Дистанционное обучение занимает особое место в системе образования, обладая массой преимуществ, и является возможной альтернативой традиционному обучению, однако имеет особенности, которые вызывают негативное отношение и ставят под угрозу успешность освоения профессиональных навыков. Многие образовательные учреждения оказались не готовы к экстренному переходу на дистанционное обучение. В то же время, Уральский федеральный университет, имеющий многолетний опыт разработки и использования онлайн-курсов, используя имеющиеся наработки и ИТ-инфраструктуру, смог перевести образовательный процесс в дистанционный режим в течение недели. Гипотезой исследования является положительная оценка студентами вынужденного перехода на дистанционное обучение, как результат экстренной цифровизации образовательного процесса. Для оценки результатов этого перехода авторами были использованы методы социального опроса, как одного из наиболее эффективных методов исследования различных социальных процессов, явлений и феноменов, сравнения полученной информации с ожидаемыми результатами и синтеза обработанных результатов. Проведенный опрос студентов об их отношении к дистанционному формату обучения позволит учесть в дальнейшем построение учебного процесса с применением цифровых методик. В настоящее время все больше возрастает дисбаланс между требованиями, предъявляемыми обществом к высшим учебным заведениям и их способностью отвечать на эти требования. В период пандемии мир стремительно меняется. Университеты, функционирующие в условиях новой цифровой реальности смогут остаться конкурентоспособными лишь в том случае, если будут развивать новые образовательные технологии, адаптированные к новым запросам абитуриентов. По мнению экспертов образовательный процесс следует менять с учетом таких трендов как интерактивность, персонализация образования, междисциплинарность, практикоориентированность, цифровизация. Ключевая тенденция современного образования – это интеграция. Образование собственной образовательной среды университета необходимо проводить на основе мнений студентов, получающих знания в этом пространстве.

Ключевые слова: COVID-19, студенты, образовательный процесс, цифровизация образования, социальные технологии.

Abstract. 2020 was a year of challenge for the entire education system, both in Russia and globally. The forced complete transition to distance learning proved to be challenging for both teachers and students. Distance learning has a special place in the education system, having a lot of advantages, and is a possible alternative to traditional training, but it has features that cause negative attitudes and threaten the success of mastering professional skills. Many educational institutions were not ready for the urgent transition to distance learning. At the same time, Ural Federal University, which has many years of experience in developing and using online courses, using the available developments and IT infrastructure, was able to

transfer the educational process to the distance mode within a week. The hypothesis of the study is a positive assessment of the students' forced to transition to distance learning as a result of the emergency digitalization of the educational process. To assess the results of this transition, the authors used the methods of the social survey as one of the most effective methods of research of various social processes, phenomena, and phenomena, comparison of the obtained information with the expected results, and synthesis of the processed results. The conducted survey of students about their attitude to the distance learning format will allow us to take into account the future construction of the educational process with the use of digital techniques. Currently, there is an increasing imbalance between the demands society places on higher education institutions and their ability to respond to these demands. The world is changing rapidly at a time of the pandemic. Universities operating under the new digital reality will be able to remain competitive only if they develop new educational technologies adapted to the new demands of applicants. According to experts, the educational process should be changed taking into account such trends as interactivity, personalization of education, interdisciplinary, practice-oriented, and digitalization. The key trend of modern education is integration. The formation of the university's educational environment should be based on the opinions of students who receive knowledge in this space.

Keywords: COVID-19, students, educational process, digitalization of education, social technology.

Введение

Университеты, работающие в новой цифровой реальности, смогут оставаться конкурентоспособными только в том случае, если будут разрабатывать новые образовательные технологии, адаптированные к новым требованиям абитуриентов. Формирование собственной образовательной среды вуза должно основываться на мнении студентов. Мир вступает в особый период времени глобализации и неопределенности. Рациональная картина мира переходит к сложности разнообразия. Достаточно бурно развиваются цифровые технологии, которые необходимо применять в образовательном процессе в таком же ритме. В цифровом образовательном процессе появляется больше выбора для обучающегося, современная образовательная деятельность определяет цели и основные задачи модернизации образования, среди которых главной является обеспечение современного качества образования на основе сохранения его фундаментальности и соответствия актуальным и перспективным потребностям личности, общества и государства. Обновление образовательной деятельности, достижение нового качества образования связывают с информатизацией образования, оптимизацией методов обучения, активным использованием технологий открытого образования. Функция преподавателя существенно меняется. Многие вещи не требуют запоминания, информация может быть найдена одним кликом мышки в компьютере. Индивидуальная образовательная траектория приобретает другой смысл. Мотивация становится мощным инструментом, чтобы менять традиционные методы обучения на занятиях. Проблема XXI века – многозадачность. Цифровые технологии не панацея от всех проблем, т.к. они являются только инструментом или средством.

Поэтому необходимо формировать такую методику обучения, при которой роль преподавателя преобразуется в роль помощника, помогающего выбирать и планировать, развивать умения саморегуляции, самокоординации. Когнитивная деятельность, направленная на освоение нового основана не на поиск дефицитного материала, а на практикоориентированность. Студент сам в процессе обучения ставит цели и задачи, в этом и заключается его мотивированность в поиске решений. В настоящее время появилась возможность не только учиться онлайн, но и участвовать в нескольких проектах одновременно, поэтому так важно построить образовательную систему, которая стремится к целенаправленному обучению. В последнее время много дебатов и диспутов проходит на тему онлайн-обучения. Основным вопросом, который подлежит обсуждению является приемлемость применения онлайн технологий в вузах.

Постановка проблемы и литературный обзор

Экстренный перевод всего образовательного процесса в дистанционный формат в марте 2020 года с одной стороны был вызовом для университетов, с другой стороны, позволил изменить отношение всех участников образовательного процесса к цифровизации образования. Для оценки отношения преподавателей и студентов к организации дистанционного обучения, было проведено много исследований, позволивших извлечь уроки от опыта дистанционного обучения и провести «работу над ошибками» для совершенствования образовательного процесса в дистанционном формате. Как отмечает Карелина, всей системе высшего образования, характеризующейся низкой скоростью изменений, необходимо научиться оперативно реагировать на решение новых задач [13]. Клячко и Синельников-Мурылев, анализируя тенденции российского высшего образования, выявили «цифровое неравенство», актуализировавшееся в условиях экстренного перехода вузов на дистанционный формат обучения [8]. С этой точкой зрения согласен Кокшаров, отмечающий с одной стороны, появление новых и усиление старых проблем, с другой – шанс пересмотра принципов организации высшего в образования [11]. Гончарова и Зайцева, изучая ответные меры российских вузов на вызовы пандемии, отметили что все российские университеты можно разделить на две группы: университеты, достигнувшие продвинутой стадии цифровой трансформации, и университеты-»цифровые новички». Во время пандемии более продвинутые университеты использовали синхронные формы обучения, а, «цифровые новички» – асинхронные [3]. Кокшаров и др., рассматривая последствия пандемии для вузов, также отметили неоднородность образовательных мощностей, особенно в региональном аспекте [10]. Гончарова, Дайнеко и Ларионова, оценивая уроки пандемии, отметили, что сложности дистанционного формата обучения привели к изменению и улучшению технологической инфраструктуры вузов [2].

Бекова, Терентьев и Малошонок, изучая взаимосвязь социально-экономического положения семьи и опыта дистанционного обучения студентов, выявили существенные различия в масштабах трудностей, с которыми столкнулись студенты, так, студенты из малообеспеченных семей, испытывали в основном трудности технического характера и проблемы с организацией своего обучения [6]. Радина и Балакина, проведя обзор исследований, влияния пандемии на образовательный процесс, также отмечают усиление неравенства в образовании, спровоцированное вынужденным переходом на дистанционный формат обучения [12]. Проведенные опросы студентов показали, что доля студентов, удовлетворенных дистанционным образованием снизилась с 21% до 14% за два месяца пандемии, а 34% студентов не считают дистанционное обучение менее эффективным, чем традиционное [3]. Основные опасения студентов были связаны с техническими сложностями (70,5%) и связанными с возможным непониманием материала (58.5%) [4], причем эти опасения чаще высказывали студенты младших курсов обучения [7]. Шалина, Степанова и Новокрещенов отмечают снижение активности образовательной деятельности и «настроения» студентов в условиях дистанционного обучения [14]. Для преподавателей вынужденный переход на дистанционное обучение увеличил объем нагрузки [15]. Панов и др. в своем исследовании результатов цифровизации образовательного процесса выявили что школьное образование готово к переходу на цифровые формы обучения не более чем наполовину и показали необходимость разработки и внедрения психолого-педагогических условий и методов, обеспечивающих эффективность цифровизации обучения, ориентированного на когнитивное и личностное развитие обучающихся [9]. Кубина и др. считают, что основная проблема дистанционного образования заключается не в эффективности учебного процесса, а в неготовности перейти на дистанционное обучение [5].

Методология

Для оценки результатов вынужденного перехода на дистанционное обучение авторами был проведен опрос студентов второго курса Института экономики и управления Уральского федерального университета при помощи анкеты из 21 вопроса, выложенных при помощи сервиса Google-форм. Анкетирование проводилось в комфортной для респондентов атмосфере, вопросы носили открытый характер или сопровождались несколькими вариантами ответов для выбора наиболее близкого ответа мнению респондента. Если опрашиваемый не был согласен с предложенными ответами, ему предлагалось написать свой вариант ответа. Из опрашиваемых 62 человек ответы дали 48 студентов. Объектом исследования было определено дистанционное обучение в университете во время пандемии. Дистанционные лекции и практические занятия проводились в соответствии с

установленным расписанием по рабочему плану группы. Во время проводимых занятий студенты могли участвовать в дискуссии по приглашению преподавателя, отвечать на вопросы и давать обратную связь. Студенты с разрешения преподавателя могли демонстрировать свои экраны с презентациями и делать доклады по исследуемым вопросам. При использовании белой доски студенты могли как наблюдать за рассуждениями преподавателя, так, и при получении прав, сами решать задачи. Контроль результатов обучения осуществлялся посредством тестирования, а также проверкой преподавателем решенных задач на платформах Moodle или Гиперметод. Студенты могли готовиться к тестированию на тренажерах, а также получать ответы на вопросы на форумах и в чатах.

Результаты и обсуждение

Целью данного исследования являлось выявление достоинств дистанционного обучения, как инструмента совершенствования образовательного процесса. Обзор литературных источников показал, что социологический опрос является наиболее эффективным при изучении социальных явлений. Отличаясь экономичностью, простотой, доступностью этот метод позволяет не только изучать мнение респондентов, но также дает возможность выявления особенностей изучаемого явления. Результатом опроса является набор данных, удобных для объективной и субъективной оценки исследуемых явлений.

Для проведения исследования была составлена анкета из 21 вопросов. Результаты проведенного исследования представлены в Таблице 1.

Таблица 1 – Результаты опроса студентов

Вопросы анкеты	**Ответы на вопросы**		
	Да	**Нет**	**Другое**
Укажите ваш возраст	-	-	19 лет – 55,6% 20 лет – 33,3% 21 год – 11,1%
Укажите ваш пол	-	-	Мужской – 42,7% Женский – 57,3%
Появилось ли у вас в период дистанционного обучения больше свободного времени?	41,7%	58,3%	-
Если дисциплина не интересна, проще ли ее изучать в дистанционном режиме?	58,3%	41,7%	-
Достаточно ли было вам общения во время дистанционного обучения?	25%	75%	-
На сколько по вашему мнению материалы, выложенные в курсах при дистанционном	57,1%	38,1%	4,8% адаптация материалов очень сильно зависит от

обучении были адаптированы для студентов?			преподавателя, читающего курс
Вы включали видеокамеру во время дистанционных занятий? Если нет, то почему.	81,1%	18,9%	непрезентабельный вид, не было требования преподавателя включить камеру, проблемы с интернетом, комфортнее без камеры
Влияет ли обратная связь от студентов на процесс дистанционного обучения?	76,7%	23,3%	
Какие форматы занятий/заданий для вас полезнее и интереснее в дистанционном формате: • Лекция, • тест, • дискуссия, • задания с обратной связью, • кейс – задание, • работы с таблицами, • групповые работы?			41,7% 25% 50% 66,7% 50% 41,7% 83,3%
Считаете ли вы, что работа в удаленном режиме хорошо совмещается с дистанционным обучением?	76,2%	23,8%	-
Считаете ли вы, что работа в обычном режиме хорошо совмещается с дистанционным обучением?	81,7%	19,3%	-
Возможно ли выстроить при дистанционном обучении график, удобный для получения качественного образования?	83,3%	16,7%	-
Улучшилось ли у вас восприятие новой информации при дистанционном обучении?	28,6%	71,4%	-
Улучшили ли вы навыки работы с компьютером при дистанционном обучении?	57,1%	42,9%	-
Улучшился ли у вас сон в результате меньшего стресса при дистанционном обучении?	33,3%	66,7%	-
Появилась ли у вас возможность выбора знаний, которые необходимы для выполнения практических заданий при дистанционном формате обучения?	41,7%	58,3%	-
Была ли у вас возможность общения с преподавателем при дистанционном формате обучения на форумах, через эл.письма, в чатах?	83,3%	16,7%	-
Достаточно ли часто лекции или практики в дистанционном режиме не проводились по техническим причинам?	16,7%	83,3%	-
Повышается ли вероятность сдачи экзаменов дистанционно?	91,7%	8,3%	-
Были ли преподавателями предложены интересные задания	83,3%	16,7%	-

с использованием компьютерных программ во время дистанционного обучения?			
Если бы у вас был выбор, то какой формат обучения вы бы выбрали • Очный • Онлайн • Смешанное: лекции онлайн, практические занятия оффлайн • Смешанное: лекции оффлайн, практические занятия онлайн	-	-	14,3% 23,8% 57,1% 4,8%

В результате проведенного анкетирования были получены следующие результаты: 58,3% студентов считают, что во время дистанционного обучения у них не получилось выделить больше времени для обучения, но если изучаемая дисциплина неинтересна, то ее проще изучать в дистанционном режиме. В процессе дистанционного обучения 75% студентов не хватало общения, однако 91,7% студентов отметили повышение вероятности сдачи экзаменов в дистанционном формате. Большинство студентов (83,3%) отмечают открытость преподавателей для общения во время дистанционного обучения и соблюдение расписания занятий, а также возможность выстраивания удобного для занятий графика рабочего дня. Большинство студентов отметили хорошую сочетаемость дистанционного обучения с работой как в обычном (81,7%), так и в удаленном режиме (76,2%). На вопрос о возможных вариантах выбора формата обучения (очный, онлайн или смешанный), большинство студентов (57,1%) считают оптимальным смешанный формат обучения, когда лекционные занятия проводятся дистанционно, а практические – очно.

Заключение

Сложности экстренного перевода образовательного процесса в полностью дистанционный формат принесли не только стресс участникам образовательного процесса, но и позволили изменить отношение к дистанционному обучению. Если до пандемии большинство относились к дистанционному обучению скептически [1], то вынужденное дистанционное обучение позволило студентам улучшить навыки работы с компьютером, уменьшить стресс про сдаче итогового контроля дистанционно, научиться выстраивать комфортный график обучения и работы, улучшить восприятие сложной информации. Умение извлекать пользу из самых сложных ситуаций, учиться новому, получать удовольствие от выполнения интересных заданий во время обучения позволит изменить отношение общества к дистанционному формату обучения. А изменение формата обучения (перевод лекций

в дистанционный режим) позволит повысить эффективность использования времени не только для студентов, но и для преподавателей.

Библиографический список

1. Cifrovaja gramotnost' rossijskih pedagogov. Gotovnost' k ispol'zovaniju cifrovyh tehnologij v uchebnom processe / T. A. Aimaletdinov, L. R. Baimuratova, O. A. Zaitseva [et al.]. – URL: http://d-russia.ru/wp-content/uploads/2019/10/digit-ped.pdf (accessed: 23.04.2021).
2. Goncharova N. Lessons of pandemic and digital development practices: UrFU experience / N. Goncharova, L. Daineko, V. Larionova. – DOI 10.34190/EEL.19.066 // Proceedings of the European Conference on e-Learning, ECEL. – 2019. – Vol. 2019 (November). – P. 145–150.
3. Goncharova N. Responses of Russian universities to the challenges of Covid-19 pandemic / N. Goncharova, E. Zaitseva. – DOI 10.34190/EEL.20.140 // Proceedings of the 19th European Conference on e-Learning, ECEL. – 2020. – Vol. 2020. – P. 221–228.
4. Educational Process Digiltalization in Ural Federal University / L. Daineko, V. Larionova, I. Yurasova [et al.]. – DOI 10.34190/EEL.20.029 // Proceedings of the 19th European Conference on e-Learning, ECEL 2020. – 2020. – P. 146–153.
5. Problems and ways of forming the educational strategy of students in the process of remote learning / E. Kubina, M. Bareicheva, N. Stepanova, K. Brown. – DOI 10.34190/EEL.20.046 // Proceedings of the 19th European Conference on e-Learning, ECEL. – 2020. – Vol. 2020. – P. 260–269.
6. Бекова С. К. Образовательное неравенство в условиях пандемии COVID-19: связь социально-экономического положения семьи и опыта дистанционного обучения студентов / С. К. Бекова, Е. А. Терентьев, Н. Г. Малошонок // Вопросы образования. – 2021. – № 1. – С. 74–92.
7. Ларионова В. А. Вынужденный переход на дистанционное обучение: ожидания и опасения студентов / В. А. Ларионова, Т. В. Семенова. – DOI 10.15826/UMPA.2020.04.032 // Университетское управление: практика и анализ. – 2020. – Т. 24, № 4. – С. 22–29.
8. Клячко Т. Л. Российское высшее образование и воздействие на него пандемии коронавируса / Т. Л. Клячко, С. Г. Синельников-Мурылев. – DOI 10.15826/umpa.2020.04.031 // Университетское управление: практика и анализ. – 2020. – Т. 24, № 4. – С. 9–21.
9. Некоторые итоги цифровизации образования на примере вынужденного удаленного школьного обучения / В. И. Панов, Н. А. Борисенко, А. В. Капцов [и др.] // Педагогика. – 2020. – Т. 84, № 9. – С. 65–77.
10. Пандемия как вызов развитию сети вузов в России: дифференциация или кооперация? / В. А. Кокшаров, Д. Г. Сандлер, П. Д. Кузнецов [и др.] // Вопросы образования. – 2021. – № 1. – С. 52–73.
11. Кокшаров В. А. Пандемия-шанс пересмотра принципов организации сети высшей школы / В. А. Кокшаров // Университетское управление: практика и анализ. – 2020. – Т. 24, № 3. – С. 5–6.

12. Радина Н. К. Вызовы образованию в условиях пандемии : обзор исследований / Н. К. Радина, Ю. В. Балакина. – DOI 10.17323/1814-9545-2021-1-178-194 // Вопросы образования. – 2021. – № 1. – С. 178–194.
13. Карелина И. Г. Чем нам запомнится уходящий 2020-й… / И. Г. Карелина // Университетское управление: практика и анализ. – 2020. – Т. 24, № 4. – С. 5–8.
14. Шалина Д. С. Активизация образовательной деятельности студентов в условиях дистанционного обучения / Д. С. Шалина, Н. Р. Степанова, С. А. Новокрещенов. – DOI 10.17513/spno.30535 // Современные проблемы науки и образования. – 2021. – № 1. – С. 36–36.
15. Экономические аспекты вынужденного перехода на дистанционное обучение, или Какую цену заплатили вузы за дистант / В. А. Ларионова, Т. В. Семенова, Е. М. Мурзаханова, Л. В. Дайнеко. – DOI 10.17323/1814-9545-2021-1-138-157 // Вопросы образования. – 2021. – № 1. – С. 138–157.

УДК 004.8

Ермакова Н.Н., Семенов Е.С.

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ СОЗДАНИЯ ГОЛОСОВОГО РОБОТА

Аннотация. Сегодня искусственный интеллект очень популярен на современном рынке информационных технологий – современные вычислительные технологии и технологии, построенные на основе нейронных сетей, уверенно входят в нашу эпоху. Статья посвящена анализу технологий создания голосового робота.

Ключевые слова: искусственный интеллект, голосовой робот.

Abstract. Today, artificial intelligence is very popular in the modern information technology market – modern computing technologies and technologies built on the basis of neural networks are confidently entering our era. The article is devoted to the analysis of technologies for creating a voice robot.

Keywords: artificial intelligence, voice robot.

Введение

Голосовой робот (или голосовой ассистент) – технология коммуникационного сервиса, позволяющая компании совершать автоматические звонки клиентам, проводить опросы, собирать сведения, а также отвечать клиентам живым голосом. Осуществляется она посредством интерактивного голосового меню (Interactive Voice Response), куда записываются сначала голосовые сообщения, откуда система маршрутизирует звонок внутри call-центра в соответствии и с тем, что ввел клиент с помощью тонального набора [1].

На сегодняшний момент доступны две разновидности голосовых роботов- первые это, так называемые, чат боты, голосовые ассистенты, и вторые – умные колонки. В коммерческой структуре они подразделяются на две деятельности – b2b, услуги предоставляются для юридических лиц (такси, выдача товаров, бронирование и т. д.) и b2c, услуги предоставляются для физических лиц (сюда можно отнести голосовые помощники Apple Siri, Яндекс. Алиса, Google ассистент).

Развитие голосовых роботов

Процесс развития голосового робота налицо- если раньше мы могли ограничиваться простым голосовым меню, то сегодня это представляется интеллектуальным роботом, способным не только задавать вопросы, но и отвечать на все возможное другие.

Первое поколение систематизации IVR реализовывались в основном, для направленности клиента к нужному специалисту. Были также версии, которые могли распознать голосовые ответы «да» или «нет».

Следующее поколение относится к голосовым роботам, осуществляющим голосовую речь механическим способом, т.е. происходит синтез речи и озвучивается текст информации.

И наконец, пришла эра Al-роботов, способных общаться максимально естественно, обучаться на проведенных ранее диалогов, и проводить анализ речи собеседника. Так, например, робот Google Duplex делает паузы «для вздоха» и добавляет междометия вроде «хм», и мы можем просто не заметить, что общаемся с роботом.

В исследовании были проанализированы четыре платформы предоставления голосового робота – Voximplant Kit, Robovoice, Infobot, Aimylogic в части ценовой политики, удобства, предоставления качественного сервиса, разнообразных дополнительных функций.

Образцы и методика эксперимента

Цель работы является -анализ технологий создания голосового робота.

Задачи работы заключались в следующем:

– провести обзор существующих платформ для создания голосовых роботов (или роботов ассистентов);
– определить процесс создания голосового робота;
– провести анализ популярных сервисов предоставления данных услуг.

Функционирование роботов осуществляется на основе одноплатных компьютеров. Существует множество видов таких компьютеров, и все они отличаются по размерам, функциям и мощности. Самые популярные платформы представлены на рисунке 1.

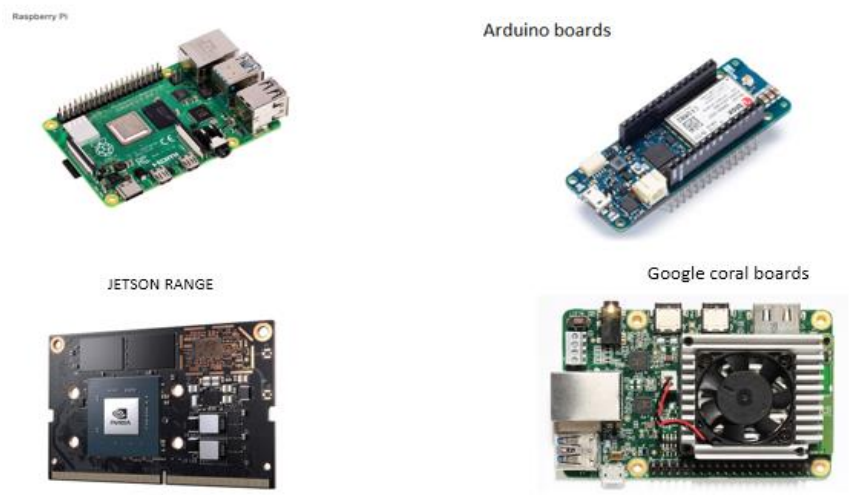


Рисунок 1 – Популярные платформы для создания голосовых роботов

Используемые платформы для создания роботов

Arduino, STM32, ESP8266, ESP32 и другие реализованные на основе (MCU) микроконтроллеров недорогие и универсальные для управления электроникой, используются в основном, для управления аппаратным обеспечением, также могут работать с датчиками.

Raspberry PI, Orange PI, и другие одноплатные контроллеры реализовываются на основе (CPU) центральных процессорных устройств, позволяющие выполнять программы на операционных системах по типу Linux. Данные процессоры программируются достаточно легко, и в любой среде, а также имеют возможность выполнять компьютерные программы на ОС Linux.(Если мы говорим о машинном обучении, CPU уступает своим аналогам, но CPU дешевые и потребляют мало энергии. Во всех остальных случаях стоит применять их).

NVidia Jetson реализуется на (GPU) графическом процессорном устройстве (применяется для обработки изображений и видео, но если используются несколько количества ядер, то тут параллельно можно и обрабатывать данные). Тем самым, NVidia Jetson применяют для обучения и работы нейронных сетей. GPU применяется для обработки потокового видео, обучения и работы нейронных сетей, 3D графики и анимации).

Google Coral реализуется на (TPU) тензорном процессоре от Google (разработан специально для TensorFlow, открытого фреймворка для машинного обучения. TPU очень хорошо подходит для приложений, в которых преобладают векторные и матричные вычисления. Разработаны специально для работы с нейронными сетями).

Процесс создания голосового робота сводится к нескольким этапам:

1) ASR (Automated Speech Recognition)– распознавание речи, голоса (рисунок 2).
2)

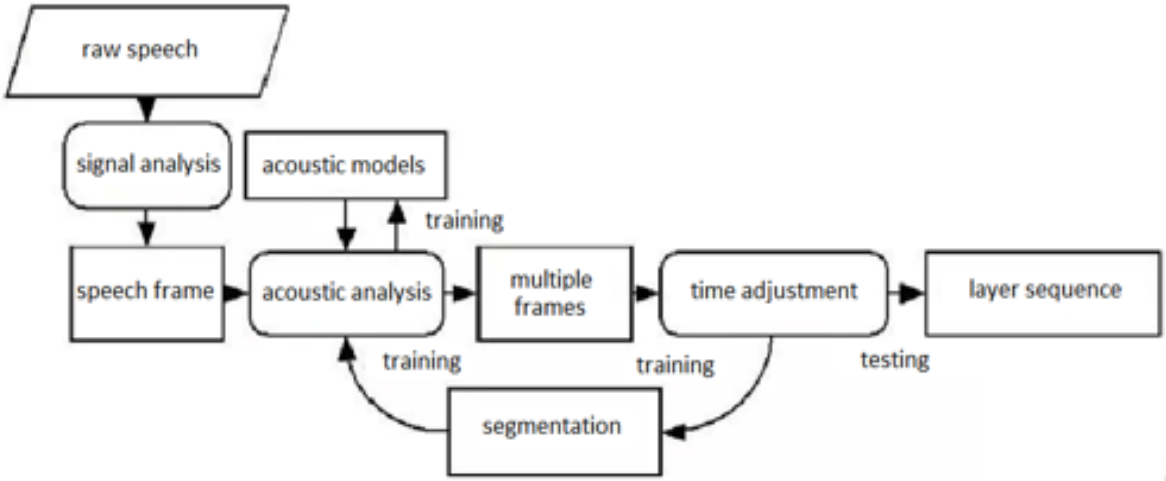


Рисунок 2 – Процесс распознавания речи

Речь клиента попадет по каналам интерфейса на сервер и разделяется на так называемые фреймы. Нейронная сеть отсеивает шумовые помехи, удаляются фреймы, не несущие звуковой окраски. Аудиопоток, очищенный от шумов, поступает в устройство акустического моделирования, где импульсы преобразуются в минимальные единицы языка (фонемы). Фонемы поступают в лингвистическую программную модель, где происходит анализ потока и из них выстраиваются законченные фразы. Для итоговой обработки полученного текста, качественный вариант записи повторно анализируется программой с учетом нейросетовой архитектуры RNNLM для получения желаемого результата. Благодаря проведенной обработке данных точность определения пола и возраста абонента возрастает практически до 100%. По эмоциональным составляющим формируется распознавание речи из аудиофайла.

Задача сервиса – отсортировать содержимое речи по звуковым сигналам, которые не имеют четких границ. Весь звуковой спектр разделяется на минимальные фрагменты по 10 мс, которые проходят процедуру акустического моделирования.

3) Извлечение (распознавание) именованных сущностей из текста (NER) (к примеру, адрес, сумма, ФИО, и т.д.).

Выделение из текста фрагментов, которые соответствуют именованным сущностям. В 1995 г. на конференции было сформулировано определение именованной сущности. Тогда под ними подразумевались только организации, место положение, объекты. На сегодняшний день этот перечень пополнился наименованием различной продукций, вызовом, номером такси и т.д.

4) TTS (Text to Speech) – генерация (синтез) речи или ответа, или как правило преобразование текста в речь.

При использовании методов машинного обучения осуществляется компьютерное моделирование речи человека из текстовых сообщений. Например, для создания IVR (англ. Interactive Voice Response) интерактивного голосового меню.

С помощью синтеза речи можно прочитать любой текст голосом, максимально похожим на естественный, будь он мужской, женский, или детский. Для достижения натуральной речи, а не синтезированной, необходимо обработать плавность звучания, паузы, интонации, тембр голоса, ударения. При этом выделяют следующие подходы:

– конкатенативный – это монтаж фрагментов записанного аудио. Отличительная особенность данного подхода заключается в высоком качестве синтезированной речи, но для машинного обучения необходим большой объем данных.

– параметрический – данный подход основывается на построении вероятностной модели, которая подбирает акустические свойства звукового сигнала для данного текста. Здесь можно не отличить речь от человеческой.

Выделяют три этапа преобразования текста в голос:

– преобразование текста в слова;
– реализация фонетической транскрипции;
– преобразование транскрипции в речь.

1. Преобразование текст в слова.

Данный алгоритм подготавливает текст и преобразовывает его в удобный формат для чтения. В текст входят также числа, сокращения, даты, время и т.д. Данные компоненты необходимо расшифровать и записать словами. Алгоритм разделяет текст на отдельные фразы, которые потом система прочитает с подходящей интонацией. При формировании фраз робот ориентируется на пунктуацию и устойчивые конструкции в тексте.

2. Выполнение фонетической транскрипции.

Данный алгоритм сортирует текст на фразы, так как в зависимости от эмоциональной окраски и смысла можно произнести одно и тоже предложение по разному. Мы также можем одно и тоже слово произнести по-разному, с разным ударением и интонацией. Для этого применяется система со встроенными словарями. При отсутствии необходимого слова, компьютер выстраивает транскрипцию самостоятельно, используя определенный алгоритм. Если это тоже не помогает, то алгоритм опирается на записи дикторов и определяет, на каких частях слов они делали акценты. Далее система рассчитывает, сколько в составленной транскрипции фрагментов длиной 25 мс. Каждый фрагмент она описывает различными параметрами: частью какой фонемы он является, какое место в ней занимает, в какой слог входит эта фонема и др. После этого система формирует подходящую интонацию с помощью данных о фразах и предложениях.

3.Преобразование транскрипции в речь.

Чтобы прочитать подготовленный текст, система использует акустическую модель. С помощью машинного обучения устанавливается связь между фонемами и звуками, придавая им верную интонацию. Для формирования речи робот использует генератор звуковых волн, в который загружаются все данные о частотных характеристиках фраз, полученные от акустической модели.

Результаты и обсуждение

На рисунке 3 представлены эксперименты в интерфейсах различных популярных сервисах по созданию голосового робота. Были выбраны сервисы:

– Voximplant Kit;
– Aimylogic;
– Infobot;
– Robovoice.
–

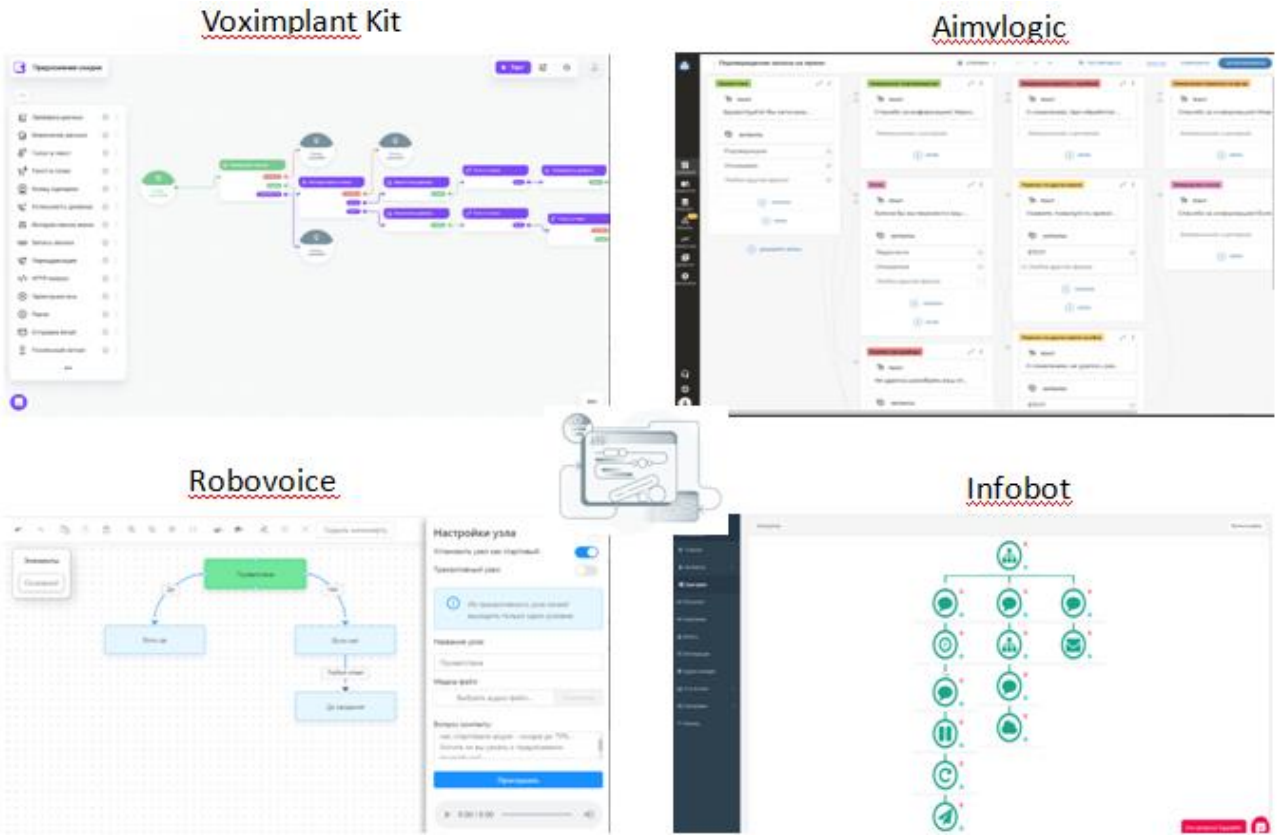


Рисунок 3 – Интерфейсы сервисов предоставления голосовых роботов

Основные параметры сравнения выбранных сервисов были следующие:

– технологии предоставления;
– простота в реализации;
– дополнительные возможности;
– ценовые параметры.

В таблице 1 представлено сравнение сервисов по выбранным параметрам.

Таблица 1- Субъективная оценка сравнения сервисов

Параметр	Voximplant Kit	Aimylogic	Infobot	Robovoice
Удобный интерфейс	да	нет	нет	да
Готовые шаблонные сценарии	10	4	3	3
Режим теста	имеется	нет	нет	нет
Синтез речи	Google, Яндекс, Тинькофф, Amazon	ASM, ЦРТ, Тинькофф, Яндекс	Яндекс	Google, Яндекс
Распознавание речи	Google, Тинькофф, Яндекс	ASM, ЦРТ, Тинькофф, Яндекс	Яндекс, Google, Тинькофф	Google, Яндекс
Искусственный интеллект	да	да	да	нет
Обработка входящих	да	нет	да	да
Готовые библиотеки	нет	да	нет	нет
Подключение SIP на вход	да	нет	нет	да
Отправка SMS, Email	да	да	да	нет
Интеграция с мессенджерами		WhatsApp, Telegram, Facebook, Messenger, Vkontakte	WhatsApp	
Наличие тестового бюджета	Индивидуально по запросу	5 минут	50руб.	нет
Пакеты для старта	Пакет «Минимальный» минута – 3р.38коп. ,абонентская плата – 9 900 руб.; пакет «Исследователь» минута стоит 3р.76 коп. и без абонентской платы	пакет «Звонки Basic» минута – 4р.72коп. ,абонентская плата – 5 900 руб.(включено 1250 минут).	пакет «Старт» минута – 2р.50коп. абонентская плата – 5 000 руб.	Пакет «Стартовый» минута – 6р.90коп. абонентская плата – 13800 руб. (входит 2 000 минут на полгода).

По нашему мнению, интерфейс Voximplant Kit конструктивно удобен для работы, процесс создания сценариев прозрачен и интуитивно понятен. В основе решения нейронная сеть (искусственный интеллект), используемая для распознавания и синтеза речи; поддерживает более 15 языков. Возможность осуществлять звонки по всем направлениям, благодаря инфраструктуре в 9 странах (центры обработки данных). Также у Voximplant Kit достаточно большое количество готовых шаблонных сценариев голосового робота, что на прямую влияет на скорость разработки сценария под ту или иную деятельность.

В качестве готовых программных решений выступают программные платформы (фреймворки) с готовыми функциями и необходимыми инструментами для создания различных решений. И их огромное количество. Существуют библиотеки отдельно для симуляции, восприятия роботом окружающей среды, навигации, машинного обучения и многого другого.

Зачастую для решения основных примитивных задач используют готовые сценарии.

Заключение

В работе были рассмотрены основные ведущие компании с готовыми решениями предоставления голосового ассистента (основные представители предоставления технологий на российском рынке Яндекс, Google, Тиньков, МТС).

Принцип работы более-менее одинаков у всех, есть конечно глобальные трудности и объективные, но основные отличия состоят в интерфейсе, или так называемом UX/UI. Общая проблема, объединяющая всех -это предоставление конечной технологии, которая позволила бы обычному человеку с нуля создать робота для своего пользования. Для ее решения необходимо прибегать к программированию, соответственно нужны определенные навыки и умения.

Рассматриваемые услуги являются лидерами в области коммуникационных редакторов, которые не требуют навыков программирования. У каждого из них есть конкурентные преимущества, которые выделяют для себя клиенты данных компаний.

На данном этапе развития все сервисы дают больше возможностей, чем используют клиенты, т.к. большая часть работы по созданию голосового робота сводится к программированию, что является сложным трудоемким процессом. Тем самым можно говорить о том, чей сервис является более простым, удобным, функциональным- станет безоговорочным лидером на рынке продаж данных услуг.

Библиографический список

1. Форд М. Роботы наступают. Развитие технологий и будущее без работы: моногр. / М. Форд. – Москва : Альпина нон-фикшн, 2016. – 430 с. – ISBN 978-5-91671-587-3.
2. Бербюк В. Е. Динамика и оптимизация робототехнических систем / В.Е. Бербюк. – Москва : Наукова думка, 2014. – 192 с. – ISBN 5-12-000495-4.
3. Поспелов Г. С. Искусственный интеллект – основа новой информационной технологии / Г. С. Поспелов. – Москва : Наука, 1988. – 278 с. – ISBN 5-02-006626-5.
4. Бейктал Дж. Конструируем роботов на Arduino. Первые шаги / Дж. Бейктал. – Москва : Лаборатория знаний, 2016. – 320 с. – ISBN 978-5-00101-095-1.
5. Тимофеев А. В. Роботы и искусственный интеллект / А.В. Тимофеев. – Москва : Наука, 2005. – 192 с.

6. Потапова Р. К. Речевое управление роботом. Лингвистика и современные автоматизированные системы / Р.К. Потапова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : СИНТЕГ, 2012. – 328 с. – ISBN 5-484-00035-1.
7. Перспективные направления развития информационно-коммуникационных технологий : (долгосрочный технологический прогноз Российский ИТ Foresight) : аналит. отчет. – Москва : Научная книга, 2007. – 272 с. – ISBN 978-5-91393-012-5.
8. Рабинер Л. Р. Цифровая обработка речевых сигналов : пер. с англ. / Л. Р. Рабинер, Р. В. Шафер ; под ред. М. В. Назарова, Ю. Н. Прохорова. – Москва : Радио и связь, 1981. – 496 с.

УДК 658.5

Гаврилова Т.О., Белых Т.А., Бородин К.И.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОТИВАЦИИ ПЕРСОНАЛА К РАЦИОНАЛИЗАТОРСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Аннотация. В статье представлена методика стимулирования персонала к рационализаторской деятельности. Выявлены причины низкой мотивации персонала. Методика основана на инструменте бережливого производства «Канбан» и объединяет в себе как материальное, так и нематериальное поощрение.

Ключевые слова: рационализаторское предложение, методика мотивации персонала, Канбан, экономический эффект, визуализация процессов.

Abstract. This article presents the method of staff incentive for rationalization activity. The reasons for low employee engagement were revealed. The method is based on the lean management tool «Kanban» and combines both material incentives and non-financial recognition

Keywords: efficiency proposal, employee engagement methods, Kanban, economic effect, process visualization.

Введение

В своей деятельности и развитии любое предприятие нуждается в непрерывном совершенствовании всех производственных процессов, поскольку это основной критерий конкурентоспособности предприятия в современных условиях [1]. Новый импульс развитию деятельности предприятия для осуществления экономического прорыва способны придать рационализаторские предложения.

Рационализаторское предложение – техническое решение, являющееся новым и полезным, направленным на экономию трудовых, сырьевых, топливно-энергетических и других материальных или финансовых ресурсов, а также улучшение условий труда и экологии. Объектами могут быть: устройство, конструкция изделия, технология производства, способ, состав материала или вещества.

Система рационализаторских предложений отлично зарекомендовала себя еще в СССР, однако в современных реалиях эта система является мало эффективной [2]. Российские предприятия часто сталкиваются с низкой мотивацией персонала к рационализаторской работе.

В ходе проведенного исследования среди предприятий были выявлены следующие причины, связанные с низкой мотивацией к рационализаторским предложениям:

– трудоемкий процесс оформления рационализаторского предложения;

– долгий процесс согласования, если имеется экономический эффект от рационализаторского предложения;
– мотивация в виде денежного вознаграждения не является эффективной;
– работа представителя по бережливому производству не результативна.

Описание методики мотивации персонала

Учитывая вышеназванные причины, была разработана методика мотивации персонала. На главном стенде предприятия представлена Канбан-доска [3], содержащая наименования: идеи; зарегистрированные рационализаторские предложения; рацпредложения, находящиеся на рассмотрении; заключение специалистов (см. рис. 1). Заключение специалистов может быть следующим: предложение принято, провести опытную проверку, отклонено. Комиссия вправе отклонить заявку, но только с обоснованными выводами о несоответствии рационализаторского предложения установленным критериям. В заключении отражается возможность и целесообразность использования данного предложения в подразделении и необходимые для этого мероприятия и средства.

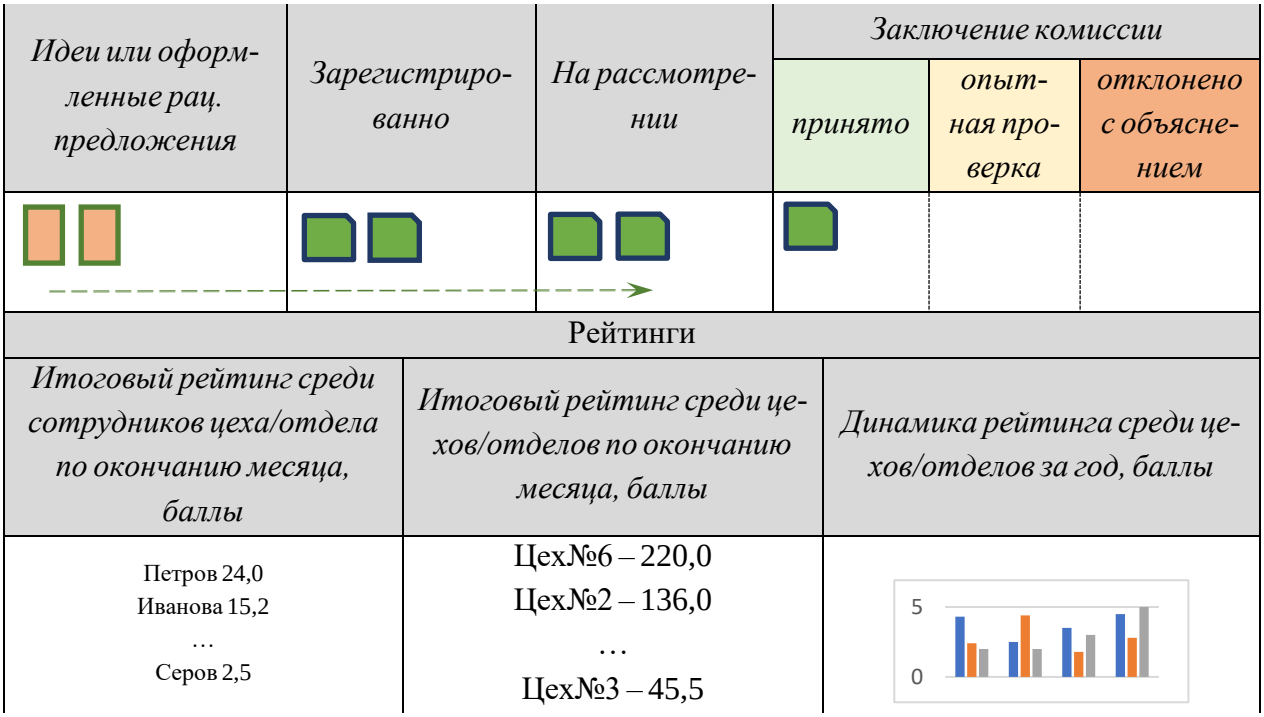


Рисунок 1 – Пример Канбан-доски

Работа Канбан-доски (рис.1) осуществляется путем перемещения карточек с одного этапа на другой, при этом строго соблюдается последовательность.

Сотрудник цеха/отдела, являющийся автором или одним из авторов, заполняет заявление в соответствии с установленной формой. Обязательными пунктами к заполнению заявления являются название рационализаторского предложения,

недостатки действующей системы, описание сущности предполагаемого решения в степени, необходимой для его практического осуществления. В необходимых случаях прилагаются чертежи.

Оформленное заявление автор помещает в соответствующую этому процессу позицию на Канбан-доске, после чего ответственный сотрудник регистрирует заявление и помещает его в конверт. Конверт содержит информацию об идентификации автора, присвоенный номер заявки, дату регистрации. Зарегистрированная карточка-конверт перемещается далее по потоку и принимает статус «на рассмотрении». На данном этапе должно быть установлено ограничение по количеству карточек с целью своевременного уведомления о перегрузке данного процесса.

В ходе рассмотрения и изучения предложения устанавливается его соответствие критериям «техническое решение», «новизна», «полезность», определяется целесообразность и возможность использования на предприятии, наличие финансовых и материальных ресурсов.

Организация и ведение работ по рационализации на предприятии возлагается должностными обязанностями на одного из сотрудников предприятия – ответственного за рационализаторскую работу, которыми являются руководители цехов или отделов.

В обязанности ответственного лица входит:

- обеспечение квалифицированной консультации рационализаторов;
- обеспечение своевременного рассмотрения и оформления заключений по предложениям;
- обеспечение внедрения в производственный процесс технических решений, изложенных в рационализаторских предложениях в установленные сроки;
- содействие в формировании команды для работы над выдвинутой идеей.

При подборе команды необходимо:

- четко определить цель;
- правильно распределить роли в группе, исходя из процессов и процедур работы;
- соблюсти межличностную гармонию в группе;
- эффективно использовать ресурсы.

Расчет эффективности рационализаторских предложений

Размер авторского вознаграждения за рационализаторские предложения определяется в зависимости от его действительной ценности, а также от проявленной инициативы. Расчет производится по следующей формуле:

$$B = 0{,}3N + 0{,}7\left(\sum_{i=1}^{n} k_{1i} + \sum_{j=1}^{m} k_{2j} \cdot k_{3j} * k_{4j}\right), \text{где} \quad (1)$$

$N -$ количество поданных заявлений; $n -$ количество принятых заявлений, имеющих экономический эффект в денежном эквиваленте; m – количество принятых заявлений, если невозможно определить экономический эффект в денежном эквиваленте; k_1 – коэффициент достигнутого экономического эффекта; k_2– коэффициент достигнутого положительного эффекта (таблица 2); k_3 – коэффициент сложности технической или иной задачи (таблица 3); k_4 – коэффициент объема использования (таблица 4).

Коэффициент достигнутого экономического эффекта находится по формуле:

$$k_1 = \frac{E \cdot 7\%}{1400}, \text{где} \quad (2)$$

Е – фактическая экономия от рационализаторского предложения, тыс. руб.

Таблица 1 – Рассчитанный коэффициент достигнутого экономического эффекта

Фактическая годовая экономия Е, тыс. руб.	k_1
100	5
500	25
1000	50

Таблица 2 – Положительный эффект, не создающий денежной экономии

Достигнутый положительный эффект	k_2
1	2
Улучшение одной из второстепенных характеристик, не являющихся определяющими для конкретной продукции или процесса, улучшение условий труда	1,2
Улучшение одной из технических характеристик детали, конструкции, схемы, техническое решение, направленное на надежность работы оборудования, на улучшение условий труда, безопасность, улучшение экологии	2,0
Улучшение более одной технической характеристики для продукции или процесса, в том числе, направленные на надежность работы оборудования, на безопасность труда, улучшение экологии или условий труда	2,5
Улучшение или восстановление основных технических или иных характеристик, являющихся определяющими для конкретной продукции или процесса, решение направленное на увеличение срока службы оборудования, улучшение условий труда на частичную автоматизацию производственных процессов	5,0

Продолжение таблицы 2

1	2
Достижение качественно новых основных технических характеристик продукции или процесса, исключение аварийных ситуаций в работе оборудования	8,0
Получение новой продукции или процесса, обладающей более высокими основными техническими характеристиками среди аналогичных известных видов; техническое решение, направленное на автоматическое управление процессом.	10,0

Таблица 3-Коэффициент сложности технической или иной задачи

Сложность решенной технической или иной задачи	k_3
1	2
Улучшение одной простой детали, улучшение одного параметра или операции простого процесса	1,2
Улучшение сборной детали, полностью составленная из сборочных единиц или узлов техники. Улучшение двух и более не основных параметров не сложных технологических процессов или иных процессов	1,5
Улучшение сложной или сборной детали, конструкция не основного узла, механизма. Изменение двух и более не основных операций технологических или иных процессов, изменение двух и более элементов организационной (управленческой) задачи и т.п.	2,0
Улучшение одного основного узла или нескольких не основных узлов машин, механизмов. Часть не основных технологических или иных процессов. Блок основных элементов организационной, управленческой задачи	2,5
Улучшение нескольких основных узлов конструкции. Часть основных технологических или иных процессов Комплекс нескольких блоков основных элементов организационной, управленческой задачи.	3,0
Улучшение основных технологических процессов или других процессов	4,0
Улучшение конструкции со сложной кинематикой, аппаратурой контроля и т.п. Комплексные технологические процессы	6,0
Изобретение со сложной системой контроля автоматических поточных линий, состоящих из новых видов оборудования, системы управления. Сложные комплексные технологические процессы	7,0
Новое изобретение, технологические процессы особой сложности, относящиеся к новым разделам науки и техники	10,0

Таблица 4 – Коэффициент объема использования

Объем использования	k_4
Применение в единичном производстве	1,5
Применение в серийном производстве	2,5
Применение в массовом производстве	4

Результат расчетной формулы выражается в баллах, которые присваивают всем сотрудникам, принимавшим участие в процессе рационализации. За каждый балл сотрудник получает премию в размере 2 тысяч рублей. Отметим, что баллы за рацпредложение делятся на количество авторов.

Полученные баллы ранжируют в порядке убывания. Первым сотрудникам, лидирующим внутри цеха или отдела, предусмотрена дополнительная премия или нематериальный бонус.

Кроме того, предусмотрен рейтинг среди всех подразделений организации (рисунок 1). По итогу месяца, баллы сотрудников каждого конкретного цеха или отдела суммируются и ранжируются в порядке убывания. На подразделение с наибольшей суммой баллов выделяются денежные средства, которые распределяются между всеми участниками.

По результатам года поощряются лидеры общего рейтинга. Самым активным рационализаторам предусмотрена главная награда в виде приобретения жилья за счет предприятия или компенсация банковских процентов ипотечного кредитования, различные квоты и другое. Также вручаются грамоты и предусмотрены номинации «самый активный», «генератор идей» и пр. Преуспевших рационализаторов может заметить руководство и продвинуть по карьерной лестнице, не исключено и коллективное признание [4].

Заключение

Канбан-доска позволяет визуализировать процессы регистрации и рассмотрения рационализаторских предложений, а также отобразить выдвинутые комиссией заключения. Вследствие этого появляется возможность моментально выявлять узкие места, что дает возможность незамедлительно предпринять корректирующие мероприятия.

Данная система мотивации направлена на стимулирование каждого сотрудника к участию в рационализаторской деятельности. Всякий сотрудник, проявивший инициативу, будет вознагражден, это побуждает генерировать идеи. Как правило, на идею собирается команда. Идею доводят до совершенства и в дальнейшем это способно дать ощутимый экономический эффект. Также к рационализаторству побуждает выстроенная конкурсная система, где видны

аутсайдеры, вследствие чего развивается соревновательный и командный дух. Таким образом, разработанная система по принципу Канбан решает проблему низкой мотивации персонала к рационализаторской деятельности.

Библиографический список

1. Quality management systems. Requirements : ISO 9001:2015 // Кодекс : нормат.-правовая база. – URL: http://docs.cntd.ru/document/1200124394 (accessed: 12.05.2021).
2. Познанский В. С. О развитии массового рабочего изобретательства и рационализаторства в СССР / В. С. Познанский // Вопросы истории. – 1960. – № 3. – С. 138–153.
3. ГОСТ Р 56407-2015. Бережливое производство. Основные методы и инструменты // Кодекс : нормат.-правовая база. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200120649 (дата обращения: 14.03.2020).
4. Маслоу А. Мотивация и личность / А. Маслоу. – Санкт-Петербург : Питер, 2008. – 351 с. – ISBN 978-5-459-00494-7.

УДК 621.039

Карташова Е.С., Данилов Д.А., Половов И.Б.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ КИСЛОРОДА В СМЕСИ ФТОРИДОВ ЛИТИЯ И БЕРИЛЛИЯ

Аннотация. Была разработана методика определения содержания кислорода в смесях фторидов лития и бериллия (ФЛАЙБ). Метод восстановительного плавления был усовершенствован применением графитовой крышки и инертным боком. Это позволило провести определение содержания кислорода в относительно легколетучей матрице ФЛАЙБа, содержащей большое количество бериллия, который имеет высокое сродство к кислороду.

Ключевые слова: кислород, ФЛАЙБ, бериллий, высокотемпературная экстракция в несущем газе.

Abstract. A method for determining oxygen in the FLiBe has been developed. The carrier gas hot extraction method was improved using a graphite crucible and a glovebox. This allowed the determination of oxygen in volatile FLiBe containing a large content of beryllium, which has a high affinity for oxygen.

Keywords: oxygen, FLiBe, beryllium, carrier gas hot extraction (CGHE).

Введение

Основным видом энергии, потребляемой во многих странах, являются: нефтепродукты, природный газ, уголь, возобновляемое топливо (солнечная и геотермальная энергии, энергия ветра, гидроэнергетика) и атомная энергетика. Возобновляемые источники энергии непостоянны: зависят от погоды и времени суток. Их отличает высокая стоимость, также они не обладают достаточной мощностью. Не возобновляемые энергетические ресурсы, либо ограничены в объемах и исчерпываются, либо их добыча и переработка становятся слишком сложной. Атомная энергетика из всех энергетических ресурсов на сегодняшний день является наиболее выгодной в связи с тем, что:

- расход применяемого топлива значительно ниже, чем в конкурирующих методах получения энергии;
- данный способ добычи энергии является экологически более чистым [1].

Комплекс мероприятий по производству ядерного топлива, его подготовке и утилизации после отработки составляет ядерный топливный цикл (ЯТЦ). Выделяют два вида ЯТЦ: открытый и закрытый (замкнутый).

Открытый ядерный топливный цикл – цикл, в котором выгруженное из реактора отработавшее ядерное топливо (ОЯТ), не идет на переработку, а поступает на хранение и является радиоактивными отходами. Открытый ЯТЦ – весьма неэффективен и неэкономичен в использовании топлива, вместе с тем есть трудности

в обеспечении долговременного хранения (высокая стоимость хранилищ и полигонов для захоронения).

Замкнутый ядерный топливный цикл – цикл, в котором ОЯТ, выгруженное из реактора, перерабатывается для извлечения U-235, Pu-239 и для повторного изготовления топлива. Создание закрытого ЯТЦ с минимальным количеством радиоактивных отходов и высокой степенью полезного использования исходного топлива – важнейшая задача современности. Её решение обеспечит человечество неисчерпаемым экологичным источником энергии. На данный момент полностью закрытый цикл нигде в мире не реализован [2].

Для создания замкнутого ЯТЦ необходимо продумать непрерывное управление ядерно-физическими, химическими и теплофизических процессами, протекающими в топливе. Лучше всего контролировать данные процессы возможно, когда топливо в реакторе находится в жидкой или газовой фазе. Такие реактора будут объединять в себе и сам ядерный реактор и систему восстановления горючего. В частности, к реакторам данного типа относится жидкосолевой реактор (ЖСР, реактор на расплавленных солях), в котором гомогенная расплавленная смесь из фтористых солей легких металлов (лития, натрия и калия или лития и бериллия) и фторидов делящихся материалов (урана, плутония или тория) образуют активную зону [3]. Реактор на расплавленных солях имеет следующие преимущества: высокоэффективный баланс нейтронов, низкую удельную загрузку топлива, большую глубину выгорания топлива, высокий уровень ядерной безопасности, возможность гибкой работы реактора в режиме переменных нагрузок, сравнительную простоту и дешевизну топливного цикла, высокое качество нарабатываемого топлива. Наиболее безопасны и перспективны реакторы с жидким топливом, в частности, топливом, находящемся в расплаве солей. Соединения урана и тория относительно хорошо растворяются в расплавах фтористых солей легких металлов – это самое важное преимущество ЖСР [4].

Как говорилось выше, уран и торий имеют высокую растворимость в расплавах фтористых солей легких металлов. Например, FLiNaK (расплав фторидов лития, натрия и калия) и FLiBe (расплав фторидов лития и бериллия). Выбор данных солей связан с тем, что изотопы, входящие в их состав, имеют малые значения захвата нейтронов, данные расплавы обладают достаточной вязкостью, теплопроводностью и теплоемкостью, что позволяет им быть хорошими теплоносителями. FLiBe сочетает в себе все данные характеристики. На его физико-химические свойства не оказывает особого влияния 1-2 % продуктов деления в реакторе. Данный расплав обладает малой коррозионной активностью к конструкционным материалам реактора, допускает переработку топлива и выделяемых продуктов деления.

Похожими на FLiBe свойствами обладает расплав фтористых солей лития, натрия, калия. Он имеет следующие свойства: делящиеся материалы растворяются в

нем лучше, но он более коррозионно-активен, чем расплав фторидов лития и бериллия. FLiNaK (LiF-NaK-KF) предполагается использовать во втором контуре теплоносителя и в качестве имитатора FLiBe ($LiF-BeF_2$) при проведении исследований, так как в его составе нет бериллия, образующего токсичные соединения [5].

Основной характеристикой, которая влияет на работу реактора на расплавленных солях, является коррозионная активность конструкционных материалов к расплавам фторидов, зависящая от содержания кислорода в солях. Следовательно, крайне важно контролировать содержание кислорода во FLiBe на стадии приготовления расплавов солей и при эксплуатации реактора.

Для определения количества кислорода или его соединений существует ряд методов анализа:

- Эмиссионная спектроскопия с искровым возбуждением;
- Эмиссионная спектроскопия тлеющего разряда по Гримму;
- Масс-спектрометрия (с искровым и лазерным пробоотбором);
- Нейтронно-активационный анализ;
- Высокотемпературной экстракции в несущем газе (метод восстановительного плавление) [6].

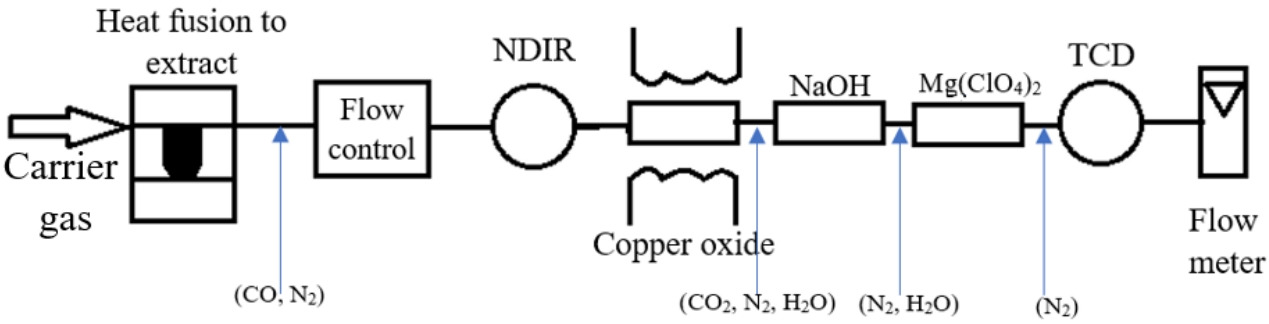


Рисунок 1 – Принципиальная схема системы определения газообразующих примесей

Метод восстановительного плавления в токе газа-носителя в последнее время получил большой толчок в развитии: были улучшены технические характеристики приборов, что позволило достичь высоких показателей точности при определении низких содержаний кислорода. Высокотемпературная экстракция основана на выделении кислорода из пробы при высоких температурах и его взаимодействии с углеродом тигля с образованием угарного газа (CO), который транспортируется газом-носителем к ИК-детектору (Рисунок 1).

Образцы и методика эксперимента

В процессе разработки аналитической методики по определению содержания кислорода в расплаве фторидов лития и бериллия методом восстановительного плавления в токе газе-носителя использовался система определения газообразующих примесей Horiba EMGA620W/C (Рисунок 2). Тонко измельченный порошок соли перемешивался в течение часа с карбидом кремния. Полученные навески (масса навески 50 мг) помещались в оловянные капсулы (Smooth Wall Tin Capsules, D4007, 18x6 mm, Elemental Microanalysis) и запечатывались. Все работы проводились в инертной атмосфере.

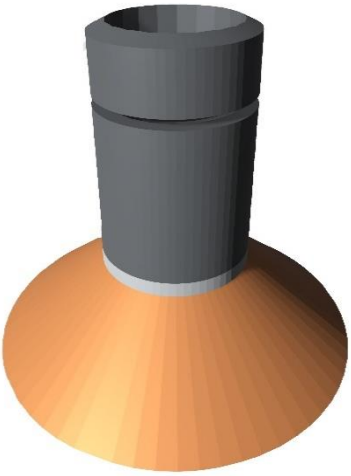


Рисунок 2 – Система определения газообразующих примесей Horiba EMGA620W и модель тигля с крышкой

Система функционирует следующим образом, в печи экстракции графитовый тигель (Graphite crucibles, C4630, Elemental Microanalysis) закрывался крышкой, плотно прилегая к верхнему электроду. При нагревании до 3000 ˚С тигель дважды дегазировался в течение 30 секунд, затем под графитовую крышку помещалась оловянная капсула с пробой и анализировалась при 2800 ˚С. Полученные летучие соединения перемещались потоком инертного газа по газовой линии прибора. При этом газ очищался от частиц углерода с помощью кварцевой ваты, а от летучих фторидов и кислых газов слоем аскарита, которые находились в пылегазовой трубке. Далее отчищенный от опасных примесей угарный газ в токе инертного газа переносился в инфракрасный-детектор (ИК-детектор) и избирательно регистрировался [7].

Схема температурного режима, используемого при анализе, представлена в таблице 1. Первая стадия, дегазация, проходит при мощности в 7 кВт и длится 35 секунд, после идет остывание тигля в течении 5 секунд для более полного удаление нежелательных веществ, попадающих в систему с тиглем. Затем наступает вторая стадия дегазации при 6 кВт, которая продолжается в течение 20 секунд. Далее печь экстракции опускается для загрузки образца в тигель в ручном режиме, при этом графитовая крышка размещается над пробой. После закрытия печи начинается анализ, который длится 75 секунд при мощности 6 кВт.

Таблица 1 – Температурный режим при анализе расплава

Стадия	Мощность, кВт	Время, с
Out Gas 1	7	30
Out Gas 2	0	5
Out Gas 3	6	20
Analysis	6	75

Градуировку проводили, применяя стандартные образцы стали (Steel Pin Standard, 0,5 g, ω(O)= 0,0056%, Elemental Microanalysis).

Для определения равновесного состава системы, определения наиболее удовлетворительной температуры проведения процесса и выявления летучих кислородсодержащих примесей применён метод термодинамического моделирования с использованием программы HSC Chemistry 6.0.

Результаты и обсуждение

Расплавы фторидов лития, натрия, калия и фторидов лития и бериллия являются сложными термодинамическими системами, так как:

- для количественной конверсии кислорода необходимо проводить процесс при высоких температурах $2500 - 3000$ °C;
- такие высокие температуры приводят к взрывообразному испарению фтористых солей и разбрызгиванию материала пробы;
- бериллий, который входит в состав FLiBe, имеет высокое сродство к кислороду и образует с ним летучие соединения.

В связи с вышеперечисленными причинами для изучения характера поведения этих систем в наших условиях использовалась программа HSC Chemistry 6.0. Так же HSC 6.0 помогает выявить мешающие компоненты, которые могут образовываться в ходе анализа.

По предварительным исследованиям, классический режим определения кислорода, применяемый для многих металлов и сплавов, не даёт

удовлетворительных результатов. Термодинамическим моделированием было установлено, что при температурах анализа, помимо угарного газа, в больших количествах образуются летучие кислородсодержащие соединения бериллия: субоксид бериллия (Be_2O) и оксифторид бериллия ($(BeF)_2O$). Вероятно, $(BeF)_2O$ покидает зону печи и конденсируется в газовых линиях или фильтрах, связывая часть кислорода пробы в аналитически не активном виде. При проведении эксперимента также было обнаружено, что происходит механическое разбрызгивание кислородсодержащих соединений при интенсивном кипении смеси фторидов.

Согласно термодинамическому моделированию (ТДМ), количественная конверсия кислорода в CO возможна или при достаточном избытке углерода над пробой, или при существенном повышении температуры.

Повышение температуры более 3000 ºC, согласно ТДМ, позволяет избежать образования нежелательных летучих кислородсодержащих соединении, однако есть определенные ограничения, связанные с:

– инструментальными особенностями проведения анализа;

– высокой летучестью фтора и бериллия при повышении температуры. [9,10]

Более удачным выглядит способ увеличения соотношения углерод-кислород. Этого можно добиться применением жидкометаллических ванн, графитового порошка, графитовых капсул или графитовой крышки.

Метод восстановления с применением платиновых ванн обеспечивает достаточную производительность, но использование данного метода ограничивается высокой стоимостью платины. Использование графитового порошка обеспечивает высокую точность анализа, однако, метод требует больших затрат по времени. Пожалуй, графитовая капсула способна создать наиболее тесный контакт между кислородсодержащими соединениями и углеродом, но процесс создания и использования данных капсул очень трудоемкий, так как нет специализированного производства, нацеленного на выпуск таких капсул. Кроме того, достаточно сложно осуществить процесс дегазации капсулы без нарушения ее функционирования [8]. Создание графитовой крышки проще и быстрее, чем капсулы. Кроме того, процесс предварительной дегазации удобно осуществить в печи экстракции (Рисунок 2).

В применении графитовой крышки есть определенный недостаток – это использование режима ручной загрузки, который приводит к увеличению контакта углерода тигля с кислородом воздуха и повышению сигнала холостого опыта. Данный недостаток можно устранить установкой бокса с инертной атмосферой в области печи экстракции.

Для оценки потерь кислорода пробы вследствие разбрызгивания относительно легкокипящей пробы были проведены две серии экспериментов. В качестве пробы использовался фторид лития, не содержащий компонентов, проявляющих высокое

сродство к кислороду. Первая осуществлялась без применения крышки в температурном интервале, соответствующем от 3 до 5,5 кВт мощности печи. Вторая серия осуществлялась уже с применением крышки в том же интервале температур. Результаты представлены в виде графика на рисунке 3.

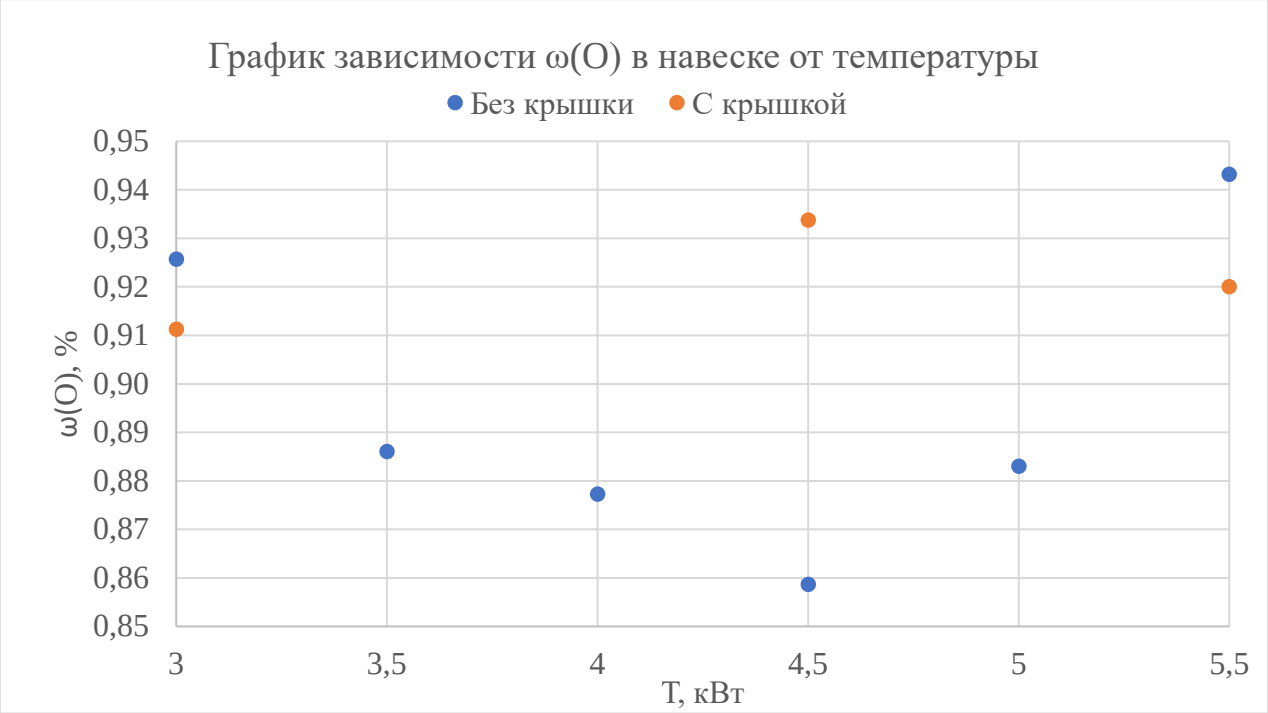


Рисунок 3 – Зависимость содержания кислорода в навеске m = 50 мг от температуры

Резкий скачок температуры, превышающей температуру кипения фторида (4,5 кВт), вероятно, ведет к механическому разбрызгиванию пробы. Причем, при низких температурах (3 кВт) данное явления не выражено, возможно, активный процесс механического разбрызгивания смеси подавлен. Напротив, при высокой температуре (5,5 кВт) данное явление должно быть максимально выражено, однако экспериментальные данные это не подтверждают. Это можно объяснить тем, что разбрызгивание пробы подавляется более интенсивным процессом испарения и активным переводом кислорода в газовую фазу. Использовании крышки во всем температурном интервале полностью нивелирует этот процесс.

Таким образом, применение крышки, позволяет решить сразу две проблемы. Во-первых, ее наличие препятствует выносу неиспарившихся капель расплава из высокотемпературной зоны. Во-вторых, образующиеся кислородсодержащие соединения могут покинуть реакционную область только через зазор между крышкой и тиглем или через пористую стенку. В обоих случаях контакт кислородсодержащих соединений с углеродом будет тесен и весь кислород конвертируется в монооксид углерода.

Ввиду отсутствия стандартных образцов содержания кислорода в расплаве, правильность и прецизионность методики устанавливалась методами добавок, разбавления и варьирования навески (Таблица 2) [11].

Таблица 2 – Метрологические характеристики

Объект анализа	Диапазон ω, %		Повторяемость		Внутрилаб. прецизионность		Правильность		Точность	
	ω_{min}	ω_{max}	S_r	$S_{r(отн.)}$ %, отн.	S_R	$S_{R(отн.)}$ %, отн.	$\Delta_{c(абс.)}$	$\delta_{c(отн.)}$ %, отн.	$\Delta_{(абс.)}$	$\delta_{(отн.)}$ %, отн.
Li_2BeF_4	0,05	0,2	0,0025	3	0,0027	4	0,004	6	0,007	10
$LiF\text{-}BeF_2$ (15% U)	0,05	0,2	0,004	6	0,005	7	0,005	7	0,011	15

Заключение

В ходе разработки методики определения содержания кислорода в расплавах фтористых солей был усовершенствован метод восстановительного плавления в токе газа-носителя применением графитовой крышки и инертным боксом. Это позволило провести определение кислорода в относительно легколетучей матрице расплава фторидов лития и бериллия, содержащей большое количество последнего, который имеет очень высокое сродство к кислороду.

Применение графитовой крышки позволило:

– предотвратить механическое разбрызгивание компонентов солей, содержащих в своем составе кислород;
– получить избыток углерода для более полной конверсии кислорода из кислородсодержащих соединений в монооксид углерода.

Дополнение системы нижний электрод–тигель–верхний электрод крышкой для тигля и инертной камерой позволило получить удовлетворительные результаты по определению содержания кислорода в смесях фторидов лития и бериллия.

Библиографический список

1. Виды источников энергии и их использование // Источники энергии. – URL: https://beelead.com/vidy-istochnikov-energii (дата обращения: 17.08.2021).
2. Бекман И. Н. Радиохимия. В 2 т. Т. 2. Прикладная радиохимия и радиационная безопасность : учеб. и практикум для вузов / И. Н. Бекман. – Москва : Юрайт, 2020. – 386 с. – ISBN 978-5-534-04182-8.
3. Ганжур О. Н. Все, что вы хотели знать о жидкосолевом реакторе / О. Н. Ганжур // Страна РОСАТОМА. – URL: https://strana-rosatom.ru/2020/09/21/vse-chto-vy-hoteli-znat-o-zhidkosolevom (дата обращения: 17.08.2021).
4. Блинкин В. Л. Жидкосолевые ядерные реакторы / В. Л. Блинкин, В. М. Новиков. – Москва : Атомиздат, 1978. – 112 с.

5. Ганжур О. Н. Жидкосолевой реактор на ГХК планируют запустить к 2031 году / О. Н. Ганжур // Страна РОСАТОМА. – URL: https://strana-rosatom.ru/2020/05/12/zhidkosolevoj-reaktor-v-razreze (дата обращения: 17.08.2021).
6. Григорович К. В. Новые возможности современных методов определения газообразующих примесей в металлах / К. В. Григорович // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – Т. 73, № 1. – С. 23–34.
7. Руководство по эксплуатации. Анализатор кислорода/азота Серия EMGA-620W. – URL: http://AppData/Local/Temp/33029-06.pdf (дата обращения: 19.05.2021).
8. Вассерман А. М. Определение газов в металлах (метод восстановительного плавления в атмосфере газа-носителя) / А. М. Вассерман, Л. Л. Кунин, Ю. Н. Суровой. – Москва : Наука, 1976. – 344 с.
9. Новоселова А. В. Аналитическая химия бериллия / А. В. Новоселова, Л. Р. Бацанова. – Москва : Наука, 1966. – 225 с.
10. Николаев Н. С. Аналитическая химия фтора / Н. С. Николаев. – Москва : Наука, 1970. – 196 с.
11. РМГ 61-2010. Государственная система обеспечения единства измерений. Показатели точности, правильности, прецизионности методик количественного химического анализа. Методы оценки : дата введения 2012-09-01 : взамен РМГ 61-2003 : утв. приказом Росстандарта 13.12.2011 № 1064-СТ). // Кодекс : нормат.-правовая база. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200094703 (дата обращения: 05.05.2021).

УДК 621.515

Кириченко В.А., Токманцев В.И.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОВЫХ ТЕЧЕНИЙ В МОЛЕКУЛЯРНОМ НАСОСЕ ХОЛЬВЕКА

Аннотация. Настоящая работа посвящена разработке и внедрению приближенных алгоритмов для оптимизационных расчетов особенностей течения разреженного газа в молекулярном уплотнении газовой, что необходимо для дальнейшего повышения точности производства и улучшения рабочих характеристик. В рассматриваемом случае сложная реальная геометрия молекулярного уплотнения заменяется модельными граничными условиями, которые содержат единственный феноменологический параметр – интегральную вероятность для частиц рассеяться с поверхности уплотнения в направлении градиента давления (против потока).

Ключевые слова: молекулярное уплотнение, насос Хольвека, метод дискретных скоростей, газовая центрифуга.

Abstract. This work is devoted to the development and implementation of approximate algorithms for optimization calculations of the features of the rarefied gas flow in the Holweck molecular pump. This is necessary for further improving the production accuracy and improving the performance characteristics. In this case, the real complex geometry of the molecular pump is replaced by model boundary conditions, which contain a single phenomenological parameter – the integral probability for particles to disperse from the compaction surface in the direction of the pressure gradient (against the flow).

Keywords: molecular pump, Holveck pump, discrete velocity method, gas centrifuge.

Введение

В настоящее время газовые разделительные центрифуги являются основным устройством для промышленного разделения тяжелых изотопов. Рост экономических запросов и принятое в российской практике правило, что каждое последующее поколение газовых центрифуг должно быть на 50% производительнее предыдущего поколения приводят к тому, что разработка более эффективных центрифуг новых поколений требует непрерывного совершенствования методов и технологий расчёта, в том числе, быстрого моделирования.

Для насосов Хольвека в зависимости от режима течения газа применяются различные способы. При континуальном режиме используются методы CFD-моделирования [1] Создаваемое в зазоре молекулярного уплотнения разрежение требует рассмотрения течения разреженного газа и решения уравнения Больцмана. Применение в последнем случае метода прямого моделирования Монте-Карло [2,3] может давать достаточно точные результаты, однако данные метод не является оптимальным как по временным затратам, так и по получаемой погрешности. Поэтому в данной работе для решения уравнения Больцмана применяется метод дискретных скоростей [4].

Постановка задачи

Рассматривается свободномолекулярное течение разреженного газа в промежутке высотой H между быстро вращающимся вокруг оси z с угловой частотой Ω внутренним цилиндром радиусом r_1 и неподвижным внешним цилиндром радиусом r_2 (см. рис. 1). Число Маха ~1, течение критическое.

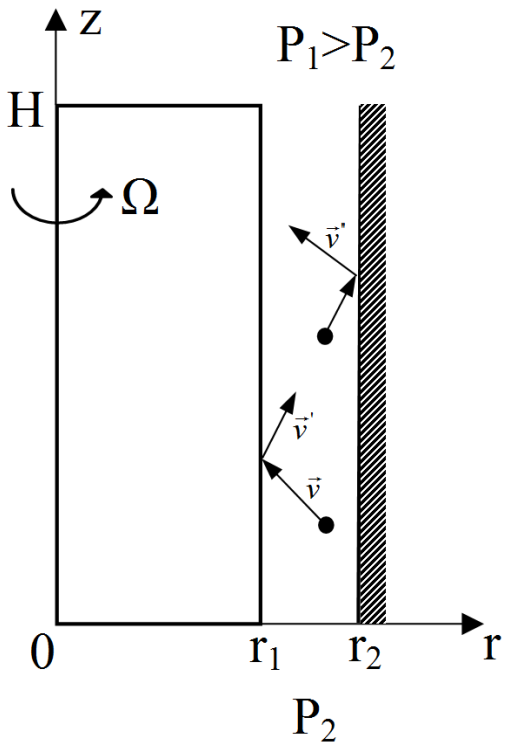


Рисунок 1 – Схематическое изображение рассматриваемой геометрии.

Постановка задачи является качественным приближением реального молекулярного насоса Хольвека. На внутренней поверхности внешнего цилиндра задаются граничные условия, имитирующие множественные реальные наклонные канавки в виде спиралей. Имитация происходит путём искусственного введения вероятности рассеяния молекул газа в направлении оси z (вверх). Вероятность рассеяния 0,5 соответствует равновероятному рассеянию вверх/вниз, то есть отсутствию канавок или их наклона. Вероятность рассеяния >0,5 вверх соответствует наличию канавок и косвенно может быть связана с их крутизной. Вероятность рассеяния вверх является одним из главных варьируемых параметров данной работы. Кроме того рассеяние происходит, в том числе, и на поверхности внутреннего вращающегося цилиндра.

Исследуются различные режимы течения, соответствующие различным параметрам разреженности среды. Температура стенок цилиндра задана и поддерживается постоянной.

Результатом являются величины потоков газа в различных направлениях и значение развиваемого молекулярным насосом перепада давления. Названные выше величины получаются в ходе численного решения уравнения Больцмана в БГК приближении.

$$\frac{\partial f}{\partial t}+\frac{\vec{p}}{m}\frac{\partial f}{\partial \vec{r}}-\frac{\partial U}{\partial \vec{r}}\frac{\partial f}{\partial \vec{p}}=\frac{f_e-f}{\tau} \qquad (1)$$

где f - некоторая функция распределения, зависящая от координат, импульсов и времени, f_e - равновесная функция распределения, к которой релаксирует система, τ - время релаксации.

Задача стационарна и решается в цилиндрической системе координат, фазовое пространство содержит дополнительные углы, характеризующие направление векторов скорости частиц: угол θ между вектором $\vec{v}$ и осью OZ, угол χ между плоскостью (r,z) и плоскостью (r,v). В качестве равновесной функции распределения берётся распределения Максвелла по скоростям с учётом общей скорости всей системы (газа).

$$f_e=\left(2\pi\frac{RT}{\mu}\right)^{-\frac{3}{2}}\cdot\exp\left[-\frac{\mu}{2RT}\left(\left(v_r-u_r\right)^2+\left(v_\varphi-u_\varphi\right)^2+\left(v_z-u_z\right)^2\right)\right] \qquad (2)$$

где v_i - компоненты скорости молекул, u_i - компоненты скорости газа, r,φ,z - пространственные координаты.

В связи с тем, что скорость вращения внутреннего цилиндра задаёт достаточно большую угловую скорость газа вокруг оси z, по сравнению с радиальной и вертикальной компонентами скорости газа, слагаемыми второго порядка малости можно пренебречь, а по слагаемым первого порядка малости разложим экспоненты в соответствующие ряды.

$$\exp\left[-\frac{\mu}{2RT}\left(v_r^2+v_\varphi^2+v_z^2+u_r^2+u_\varphi^2+u_z^2-2v_ru_r-2v_\varphi u_\varphi-2v_zv_z\right)\right]=$$
$$=\exp\left[-\frac{\mu}{2RT}(v_r^2+v_\varphi^2+v_z^2)\right]\cdot\exp\left[-\frac{\mu}{2RT}(-2v_ru_r+u_r^2)+(-2v_\varphi u_\varphi+u_\varphi^2)+(-2v_zu_z+u_z^2)\right]=$$
$$=\exp\left[-\frac{\mu}{2RT}v^2\right]\cdot\left(1+\frac{\mu}{2RT}2v_ru_r\right)\cdot\exp\left[-\frac{\mu}{2RT}(-2v_\varphi u_\varphi+u_\varphi^2)\right]\cdot\left(1+\frac{\mu}{2RT}2v_zu_z\right)$$

Несмотря на то, что рассматриваемая модельная геометрия обладает осевой симметрией, для рассмотрения более общего случая, с отсутствием осевой симметрии, что соответствует реальному молекулярному насосу Хольвека, требуется учёт зависимости функции распределения не только от пространственных координат, но и от скоростных координат. В рассматриваемом случае данная

зависимость выражается в наличии производной функции распределения по одному из дополнительных углов, характеризующих направление скорости молекулы. Окончательно, производя определённые замены, получаем окончательный вид необходимого для решения уравнения Больцмана в безразмерном виде.

$$c_r \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{c_\varphi}{r}\left(\frac{\partial \Phi}{\partial \varphi} - \frac{\partial \Phi}{\partial \chi}\right) + c_z \frac{\partial \Phi}{\partial z} + \delta\Phi =$$
$$= \left(2\pi \frac{RT}{\mu}\right)^{-\frac{3}{2}} \exp(-c^2)\delta n(1 + 2c_r d_r + 2c_z d_z)\exp(2c_\theta d_\theta - d_\theta^2) \qquad (3)$$

где:

$c_r = c\sin(\theta)\cos(\chi);$

$c_\varphi = c\sin(\theta)\sin(\chi);$

$c_z = c\cos(\theta);$

$c_i = \dfrac{v_i}{\sqrt{\dfrac{2RT}{\mu}}};\ d_i = \dfrac{u_i}{\sqrt{\dfrac{2RT}{\mu}}};$

v_i - компоненты скорости молекул, u_i - компоненты скорости газа, r, φ, z - пространственные координаты, θ – угол между вектором $\vec{v}$ и осью OZ, угол χ – угол между плоскостью (r, z) и плоскость (r, v), Φ – поток, δ - параметр, характеризующий разреженность среды.

Описание и проверка алгоритма

Решение поставленной задачи осуществляется методом дискретных скоростей. Метод дискретных скоростей является универсальный методом построения дискретных моделей непосредственно из уравнения Больцмана. Получаемые таким образом модели наследуют основные свойства уравнения Больцмана – законы сохранения и теорему Больцмана и могут быть использованы для решения задач динамики разреженного газа. Данный метод позволяет получать дискретные модели на произвольной сетке узлов в скоростном пространстве. Однако для получения содержательных дискретных моделей с ненулевым интегралом столкновений необходимы специальные методы отбора узлов дискретной скоростной сетки и особенные способы обхода этой сетки. Для того чтобы построить полную дискретную сетку, заполняющую заданную область пространства, достаточно покрыть геометрическую сетку в каждом узле дополнительными скоростными сетками. Конструирование дискретной сетки начинается с определения исходного множества узлов, которое затем по определенному алгоритму будет дополняться новыми узлами, уплотняя сетку на поверхности

цилиндров. Исходное множество подбирается из условия соотношения сторон. Таким образом, полученная сетка порождает некоторую дискретную модель.

Предварительные расчёты, направленные на выявление недостатков и ошибок вышеописанного алгоритма, осуществлялись с использованием некоторых модельных задач, таких как моделирование течения газа в трубе, моделирование течения газ во вращающееся цилиндре, моделирование течения газа между двумя статичными и движущимися цилиндрами и др. Данные задачи имеют более простые граничные условия и заранее известные решения. Отработка различных элементов алгоритма в соответствующих условиях показала работоспособность полученного алгоритма и наличие возможности перехода к моделированию непосредственно самого насоса Хольвека, пускай и в упрощённом формате.

Результаты и обсуждение

Результатом расчёта, выполненного с помощью описанного выше алгоритма, являются величины потоков газа в зазоре между цилиндрами и степеней сжатия, развиваемых молекулярным насосом Хольвека полученных при разных параметрах разреженности газа в зазоре между цилиндрами.

Для выполнения расчёта был выбран диапазон вероятностей рассеяния вверх [0,5;0,95]. Выбор именно такого диапазона связан со следующими факторами: вероятность рассеяния <0,5 соответствует нагнетанию в полость между цилиндрами, что не соответствует реальному насосу Хольвека, вероятность >0,95 является нефизичной, т.к. невозможно создать реальною геометрию способную отражать абсолютно все молекулы в одну сторону.

Диапазон параметров разреженности выбран из следующих принципов: создание крайне малой предварительной разреженности $\delta < 10$ невозможно из-за ограниченности форвакуумных насосов (давление предварительного вакуума редко достигает 10^{-3} Па), разреженность $\delta > 1000$ уже близка к сплошной среде, в которой молекулярный насос Хольвека не эффективен.

Вне зависимости от параметра разреженности наблюдается определённый вид зависимости потока газа вверх и вниз в зависимости от вероятности рассеяния вверх (см. рис. 2). Изменение относительной величины потока близко к линейному. При вероятности рассеяния 0,5 потоки вверх и низ равны друг другу. При вероятности рассеяния, стремящейся к единице, поток устремляется в одну сторону, что полностью соответствует реальной ситуации. Канавки в молекулярном насосе создают неоднородность рассеяния молекул, формируя стабильную разницу между потоками. Флуктуации потоков можно объяснить дискретность разбиения пространства и неточностью, вносимой статистическими способами описания систем, содержащих большое количество частиц.

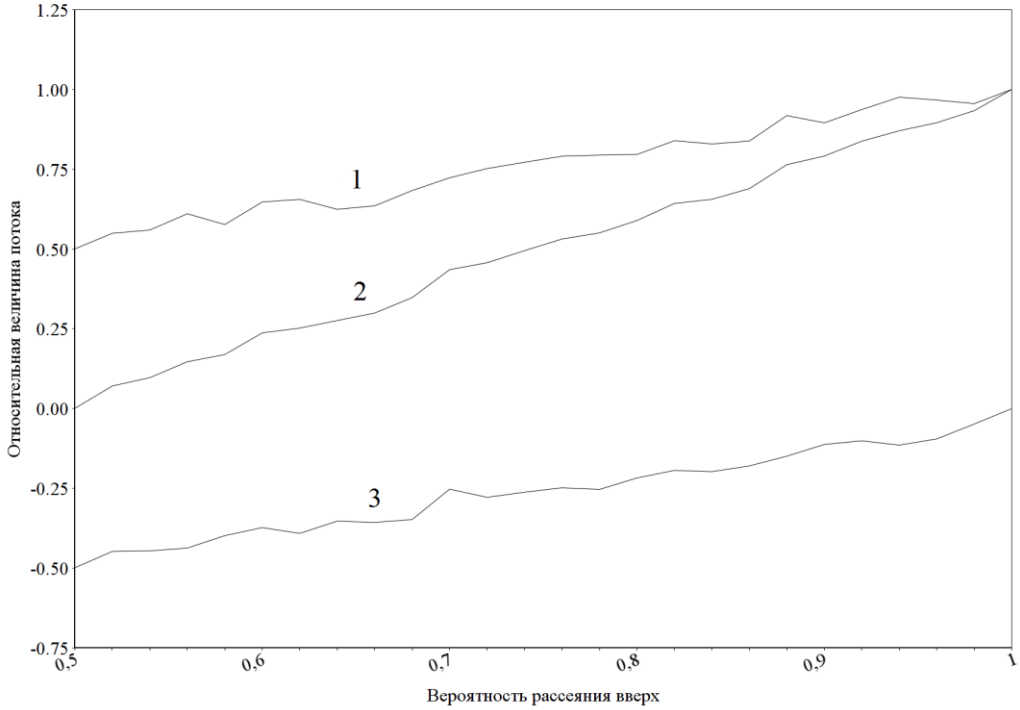


Рисунок 2 – Относительное изменение потоков (доля от суммарного потока) вверх и вниз в зависимости от вероятности рассеяния вверх, 1 – вверх, 2 – суммарный, 3 – вниз.

Величина создаваемой степени сжатия является главной характеристикой любого насоса. Степень сжатия вычисляется как отношение давления, предварительно созданного в зазоре, к давлению, создаваемому молекулярным насосом, т.е. во сколько раз молекулярный насос может дополнительно снизить давление.

$$\Delta P = \frac{P_{форвакуум}}{P_{зазор}} \qquad (4)$$

Согласно расчёту, степень сжатия в данном случае сильно зависит от разреженности среды, в которой работает насос (см. рис. 3). При вероятности рассеяния 0,5 степень сжатия ≈0, что логично, т.к. не создаётся разности потоков вверх и вниз и, следователь, степень сжатия не может быть создана. С ростом вероятности рассеяния растёт и степень сжатия, причем глубже вакуум (меньше параметр разреженности), тем больше развиваемая степень сжатия, что соответствует специфике молекулярного насоса, причём наблюдается нелинейный рост зависимости.

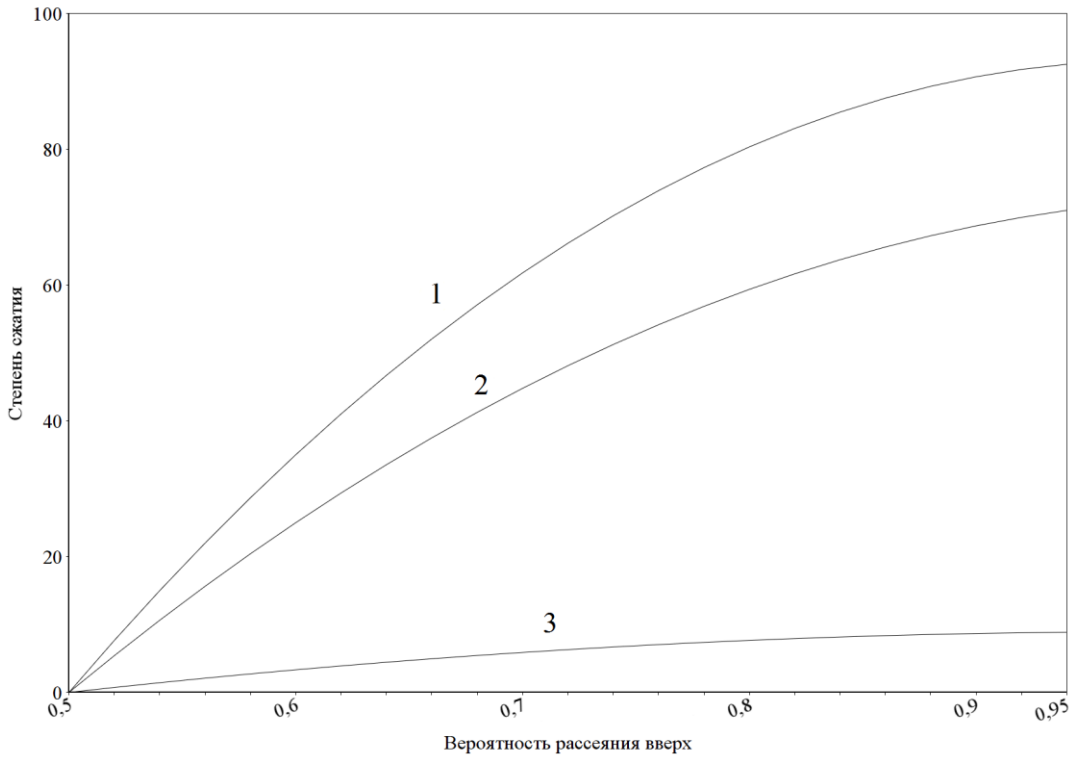


Рисунок 3 – Степени сжатия, создаваемые молекулярным насосом, полученные в ходе расчёта в зависимости от параметра разреженности и вероятности рассеяния вверх, 1 – δ=10, 2 – δ=100, 3 – δ=1000.

В таблице 1 приведен набор конкретных численных значений степеней сжатия при различных параметрах разреженности газа. Можно заметить, что в наиболее благоприятном для молекулярного насоса Хольвека режиме, т.е. при низком предварительном вакууме $\delta = 10$, степень сжатия достигает 92 единиц. Иными словами молекулярное уплотнение способно дополнительно снизить и поддержать давление в зазоре между ротором и статором центрифуги на два порядка, по сравнению с предварительным вакуумом.

Таблица 1 – Примеры степеней сжатия, создаваемые молекулярным насосом, полученные в ходе расчёта в зависимости от параметра разреженности и вероятности рассеяния вверх.

Вероятность	$\delta = 10$	$\delta = 100$	$\delta = 200$	$\delta = 500$	$\delta = 1000$
0,5	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0
0,6	35,0	24,9	17,7	9,7	3,3
0,75	72,2	51,2	36,8	19,5	6,7
0,8	80,3	59,4	42,9	22,3	7,7
0,95	92,5	70,9	52,4	25,8	8,9

Заключение

Полученные результаты представляют интерес для дальнейшего развития математической модели молекулярного насоса Хольвека, моделируемой методом дискретных скоростей. Установления более сложных граничных условий, соответствующих реальным канавкам в насосе, даст возможность получить полноценный алгоритм для расчёта молекулярного уплотнения газовой центрифуги в виде насоса Хольвека методом дискретных скоростей. Описанные в данной работе результаты будут использоваться для проверки правильности функционирования программы, рассчитывающей реальный насос.

Библиографический список

1. CFD-based analysis of gas flow in dry scroll vacuum pump /Xiang-jiYue, Ying-liZhang, Ze-haoSu [et al.]. – DOI 10.1016/J.VACUUM.2017.02.019 // Vacuum. – 2017. – Vol. 139. – P. 127–135.
2. Prediction of the compression ratio of a Holweck-type molecular pump with the presence of multi-component gases using a modified Sickafus method for high-speed rotors / Sadegh Yousefi-Nasab, J. Safdari, J. Karimi-Sabet, M. Khajenoori. – DOI 10.1016/j.vacuum.2019.109056 // Vacuum. – 2020. – Vol. 172. – P. 157–161.
3. Shirinov A. High vacuum side channel pump working against atmosphere / A. Shirinov, S. Oberbeck. – DOI 10.1016/J.VACUUM.2010.12.018 // Vacuum. – 2011. –Vol. 85. – P. 1174–1177.
4. Нурлыбаев Н. А. Метод дискретных скоростей для решения уравнения Больцмана / Н. А. Нурлыбаев // Журнал вычислительной математики и математической физики. –1992. – Т. 32, № 11. – Р. 1829–1834.
5. Квасников И. А. Термодинамика и статистическая физика. В 3 т. Т. 3 / И. А. Квасников. – 2-е изд. – Москва : Едиториал УРСС, 2003. – 448 с. – ISBN 5-354-00079-3.
6. Токманцев В. И. Неравновесная статистическая термодинамика разреженных газов / В. И. Токманцев, В. Д. Селезнёв. – Алма-Ата, 1996. – 371 с.
7. Черчиньяни К. Теория и приложения уравнения Больцмана / К. Черчиньяни. – Москва : Мир, 1978. – 496 с.
8. Годунов С. К. О дискретных моделях кинетического уравнения Больцмана / С. К. Годунов, У. М. Султангазин // Успехи математических наук. – 1971. – Т. 26, № 3. – С. 3–51.

УДК 621.039

Литовченко В.Ю., Васютин Н.А., Ташлыков О.Л., Козлов Ан.В., Селезнев Е.Н.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ КОНТЕЙНЕРОВ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ КОНДИЦИОНИРОВАННЫХ ЖИДКИХ ОТХОДОВ

Аннотация. Представлен обзор работ, проводимых совместно специалистами УрФУ и АО «Институт реакторных материалов» по расчетно-экспериментальным исследованиям состава комбинированной радиационной защиты. Выполнен анализ результатов работ по проектированию состава гомогенных радиационно-защитных материалов (РЗМ) и их потенциала в реализации принципа оптимизации при планировании радиационно-опасных работ на примере кондиционирования жидких радиоактивных отходов при ионоселективнойочистке.

Ключевые слова: радиоактивные источники, безопасность; доза облучения; нормы безопасности; оптимизация радиационной защиты, источник гамма-излучения, защита и безопасность, жидкие радиоактивные отходы, (ЖРО), ионоселективная очистка ЖРО, цементирование ЖРО, зола, золобетон, гранатовый песок.

Abstract. A review of the work carried out jointly by specialists from UrFU and JSC «Institute of Nuclear Materials» on the experimental design studies of the composition of combined radiation protection is presented. The analysis of the results of designing the composition of homogeneous radiation protective materials (RPM) and their potential in the implementation of the optimization principle in the planning of radiation hazardous work using the example of conditioning liquid radioactive waste during ion selective cleaning is carried out.

Keywords: radioactive sources, safety of; irradiation dose; safety standards; optimization of radiation protection, gamma radiation source,protection and safety, liquid radioactive waste (LRW), ion-selective purification of LRW, cementation of LRW, ash, ash concrete, garnet sand

Введение

Дозовые затраты при проведении радиационно-опасных работ снижают посредством воздействия на факторы времени, расстояния ирадиационный параметр. Первые два фактора требуют предварительной проработки и в ряде случаевзначительных затрат (например, использование дистанционных приспособлений, автоматов для сварки и контроля, робототехники, тренировка персонала на тренажерах и макетах и т.д.). Третий фактор носит многогранный характер: предполагается использование различных вариантов снижения уровня излучения от оборудования и трубопроводов, начиная с масштабных (снижение содержания кобальта, а также других легкоактивируемых элементов в конструкционных материалах, соблюдение оптимального ВХР и т.д.) и заканчивая дезактивацией оборудования и трубопроводов, использованием экранирования и т.д. [1].

Экранирование, как один вариантов воздействия на радиационный параметр, является одним из наиболее распространенных способов снижения облучаемости

персонала при работах в радиационных полях. Временные защитные экраны (свинцовые листы, плиты, стальные листы, бетонные переносные стенки и т.д.) используются как для отдельных операций, так и для рабочей зоны в целом [2].

Наиболее эффективны для уменьшения мощности гамма-излучения, определяющего основную дозовую нагрузку персонала при ремонте, модернизации, выводе из эксплуатации, защитные экраны, наполнителем которых являются материалы с большим атомным номером и высокой плотностью (например, железо, свинец, вольфрам). В некоторых случаях в качестве наполнителей строительных материалов для защиты помещений с источниками ионизирующих излучений можно использовать другие компоненты (в том числе природные минералы), например, барит, как добавку в штукатурку для защиты (например, рентгеновских кабинетов) [3].

Среди традиционных защитных материалов наиболее эффективны свинец и вольфрам. Однако их стоимость весьма значительна. Основным экранирующим материалом в настоящее время остается свинец. Применение листового свинца толщиной более 5 мм требует сложных конструкционных решений из-за его пластичности. Для надежной фиксации свинцовых листов на вертикальной поверхности требуется большое число точек крепления, что приводит к возникновению «очагов прорыва» защиты, особенно при наличии вибрации. Также необходимо учитывать токсикологическую опасность свинца и высокие расходы на утилизацию материалов, содержащих свинец[4].

Предмет исследования

Поскольку поглощающая способность материала зависит от спектра γ-излучения (изотопного состава) радиоактивных загрязнений, в свете реализации принципа оптимизации радиационной защиты значительный потенциал имеет подбор (проектирование) состава поглотителей (химических элементов), оценка ослабляющейγ-излучение способности более дешевых материалов или гомогенной защиты в виде матрицы со свинцовым или вольфрамовым наполнением с требуемой концентрацией [5].

С 2011 г. специалистами кафедры «Атомные станции и ВИЭ» УрФУ и АО «ИРМ» ведутся работ по оптимизации состава РЗМ применительно к планируемым условиям облучения[6], [7]. Целью расчетно-экспериментальных исследований, проводимых на первом этапе, была разработка и верификация гомогенных РЗМ с заданным содержанием наполнителей, адаптированных к радиоактивным загрязнениям систем объектов использования атомной энергии (ОИАЭ), различающимся изотопным составом. В дальнейшем исследования были направлены на оптимизацию состава РЗМ применительно к нейтронному и смешанному гамма- и нейтронному излучению[8].

В настоящее время ведутся расчетно-экспериментальные исследования по

обоснованию емкости контейнеров НЗК по изотопам цезия-137 и кобальта-60 прикондиционировании ЖРО методом ионоселективной очистки[9], оптимизации состава комбинированной радиационной защиты от жесткого бета-излучения[10], изучению радиационно-защитных свойств природных минералов для оценки потенциальной возможностиих использования в составе строительных материалов при сооружении ОИАЭ[11],[12].

Для защиты от высокоэнергетического бета-излучения применяются либо толстые слои тяжелого материала (например, свинца), чтобы подавить возникающее вторичное тормозное излучение, либо легкие вещества (такие как полиэтилен, парафин, алюминий) для уменьшения его генерации в сочетании с тяжелыми. Для ослабления гамма-излучения применяются исключительно тяжёлые металлы (свинец, чугун, вольфрам, обеднённый уран).

Однако использование чистых материалов может оказаться неэффективным, защита будет занимать большое пространство, либо иметь большой вес или высокую стоимость. В работе [13] рассматриваются варианты решения данной проблемы с использованием комбинированной защиты, с помощью которой можно добиться той же эффективности при уменьшении размеров и стоимости.

Определенное взаимное расположение слоев различных материалов на пути распространения излучения также позволяет повысить эффективность защиты.

Для верификации данных, полученных расчетным путем, в АО «Институт реакторных материалов» проводится серия экспериментов по определению поглощающих свойств комбинированных материалов по отношению к ионизирующему излучению различных энергий.

Одной из важных задач при выводе из эксплуатации блоков АЭС, в том числе с реакторами на быстрых нейтронах является переработка (отверждение) жидких радиоактивных отходов (ЖРО) [14]. Существенно более высокие возможности селективной сорбции в сокращении объемов конечного радиоактивного продукта определяют её преимущества по сравнению с другими методами переработки кубовых остатков, позволяя сконцентрировать радионуклиды ЖРО в небольшом объеме сорбента [15].

Высокая эффективность неорганических сорбентов нового поколения повышает эффективность установок ионоселективной сорбции при условии решения задачи безопасного хранения отработанного сорбента средней и высокой активности в местах переработки, транспортировки и захоронения. В связи с этим, важным условием реализации данной технологии является оптимизация радиационной защиты контейнера с радиоактивными отходами [16].

Проводимые расчетно-экспериментальные исследования комбинированных радиационно-защитных материалов направлены на реализацию одного из основных принципов радиационной защиты – принципа оптимизации [8].

Исходные данные модели задачи

Для захоронения отходов атомных станций используется контейнер типа НЗК-150-1,5П.

Внутрь контейнера помещается вкладыш (или вкладыши) толщиной 2 см из нержавеющей стали. Эффективность его использования представлена в работе. Вкладыш из стали позволяет существенно снизить мощность дозы от поверхности контейнера. Далее во вкладыше размещается цементная матрица, содержащая конденсированные ЖРО.

Матрица с ЖРО представляет собой смесь бетона марки М500 объёмом 400 л и водным раствором сорбента объёмом 200 плотностью 1 кг/л. Смесь бетона и сорбента образует цементный компаунд, который размещается внутрь контейнера. Часть воды в матрице замещается водным раствором. В качестве изотопов, содержащихся в сорбенте и вносящих основной вклад в мощность дозы, рассматривалисьцезий-137 с удельной активностью 0,1 Ки/кг и кобальт-60с удельной активностью 0,0001 Ки/кг.

Задача заключается в том, чтобы подобрать оптимальный состав радиационно-защитного материала и геометрию источника таким образом, чтобы мощность дозы на расстоянии 1 метра от поверхности контейнера составляла не более 40 мкЗв/ч.

В качестве радиационно-защитного материала, который размещается между стальными вкладышами и внутренними стенками контейнера или как экранирующий материал, засыпаемый или закладываемый вместе с матрицей ЖРО, рассматриваются следующие материалы:

– зола;
– золобетон;
– гранатовый песок;
– бетон.

Бетон здесь выбран в качестве распространённого материала, относительно которого будет производиться сравнение других. Приведём описание каждого из них.

Зола – несгорающий остаток с зернами малых размеров (менее 0,2 мм), образующийся из минеральных примесейтоплива при полном его сгорании и осажденный из дымовых газов золоулавливающими устройствами. В зависимости от вида топлива онаподразделяется на антрацитовую, каменноугольную, буроугольную, сланцевую, торфяную и др. Зола имеет на сегодняшний день достаточно большой спектр применения: укрепление грунта, прокладка дорог, изготовление бетонов, наполнители и т.д. Тем не менее, проблема золоотвалов по-прежнему не решается полностью.

Ежедневно тепловые станции производят несколько десятков тысяч тонн несгораемого остатка. Кроме того, в них содержатся ядра U, Th, Ra, K-40, Cs-137. Захоронение золы отдельно оказывается нецелесообразной и дорогостоящей операцией. Однако, использование её в качестве радиационной защитыможет

снизить затраты на обращение, кроме того, как будет показано далее, она обладает хорошими радиационно-защитными свойствами.

В модели задачи рассматривается состав золы, как сыпучего материала, приведённый в таблице №1. Насыпная плотность принимается 1,45 кг/л. Предполагается, что между зернами имеется воздух.

Таблица 1 – Состав золы каменного угля

Химическое соединение	Массовая доля, %
SiO_2	60
Al_2O_3	25
Fe_2O_3	10
K_2O	3,5
CaO	1,5

Золобетон – разновидность лёгкого бетона, в котором одним из связующих материалов выступает зола [17]. Такие материалы обладают износостойкостью и способны сохранять свои начальные эксплуатационные свойства. В качестве радиационно-защитного материала рассматривается такой продукт, в котором массовое содержание золы превышает 50% от общей массы. Состав приводится в таблице №2, плотность золобетона принимается равной 1,751 кг/л.

Таблица 2 – Состав золобетона вибровакуумированного

Добавка	Массовая доля, %
Цемент М400	67,39
Зола	16,85
Вода	15,76

Третий рассматриваемый материал – гранатовый песок, представляет собой гранулы природного минерала – альмандина граната. Этот материал устойчив к деградации, достаточно крепкий, имеет высокую удельную плотность, твёрдость. Одна из основных областей его применения – использование в пескоструйных аппаратах по очистке поверхностей, очистка вод, производство керамики, резка и т.д.

В качестве радиационно-защитного материала рассматривается одна из разновидностей гранатового песка – аллювальный (в виде сыпучего материала), насыпная плотностькоторого составляет 2,38 кг/л. В таблице 3 приводится химический состав песка. Предполагается, что между внешней поверхностью зёрен содержится воздух.

Таблица 3 – Состав аллювального гранатового песка

Элемент	Массовая доля, %
SiO_2	38
Al_2O_3	20
Fe_2O_3	2
TiO_2	1
CaO	2
FeO	30
MgO	6
MnO	1

Помимо выбора материала в качестве защиты также рассматривается геометрическое расположение источника излучения внутри контейнера. В настоящей работе рассматриваются несколько вариантов, которые будут представлены ниже, любой предполагает использование стального вкладыша с толщиной стенки 2 мм. Модели построены и рассчитаны в программе, реализующей метод Монте-Карло. Всего рассматривается 7 различных вариантов геометрии. Для упрощения расчёта и построения расчётных моделей были использованы простые поверхности.

На рисунке 1,а представлена геометрия источника №1, которая была рассмотрена в работе. Кондиционированные ЖРО в цементной матрице помещаются в стальной вкладышс размерами, указанными на рисунке. Оставшаяся полость между ним и стенками контейнера заполняется радиационно-защитным материалом. Снаружи контейнера на расстоянии 1 м от поверхности располагаются детекторы радиусом 10 см, являющиеся имитаторами человеческой ткани.

Второй вариант геометрии (рисунок 1,б) является аналогом первого, он имеет отличие в том, что габариты стального вкладыша были изменены, при этом объём загружаемых ЖРО не изменяется, происходит увеличение ширины и длины, а высота при этом уменьшается.

Третий вариант геометрии (рисунок 1,в) предполагает фрагментацию цементной матрицы ЖРО в несколько стальных вкладышей, которые равноудалены друг от друга и от центра контейнера, не меняя объёма загрузки.

Четвёртый вариант геометрии предусматривает последовательное чередование цементной матрицы ЖРО и радиационно-защитного материала, толщина слоёв была выбрана таким образом, чтобы разместить заданное количество отходов. На рисунке 2,а представлено поперечное сечение контейнера с такой геометрией, высота матрицы и радиационно-защитного материала составляет 800 мм.

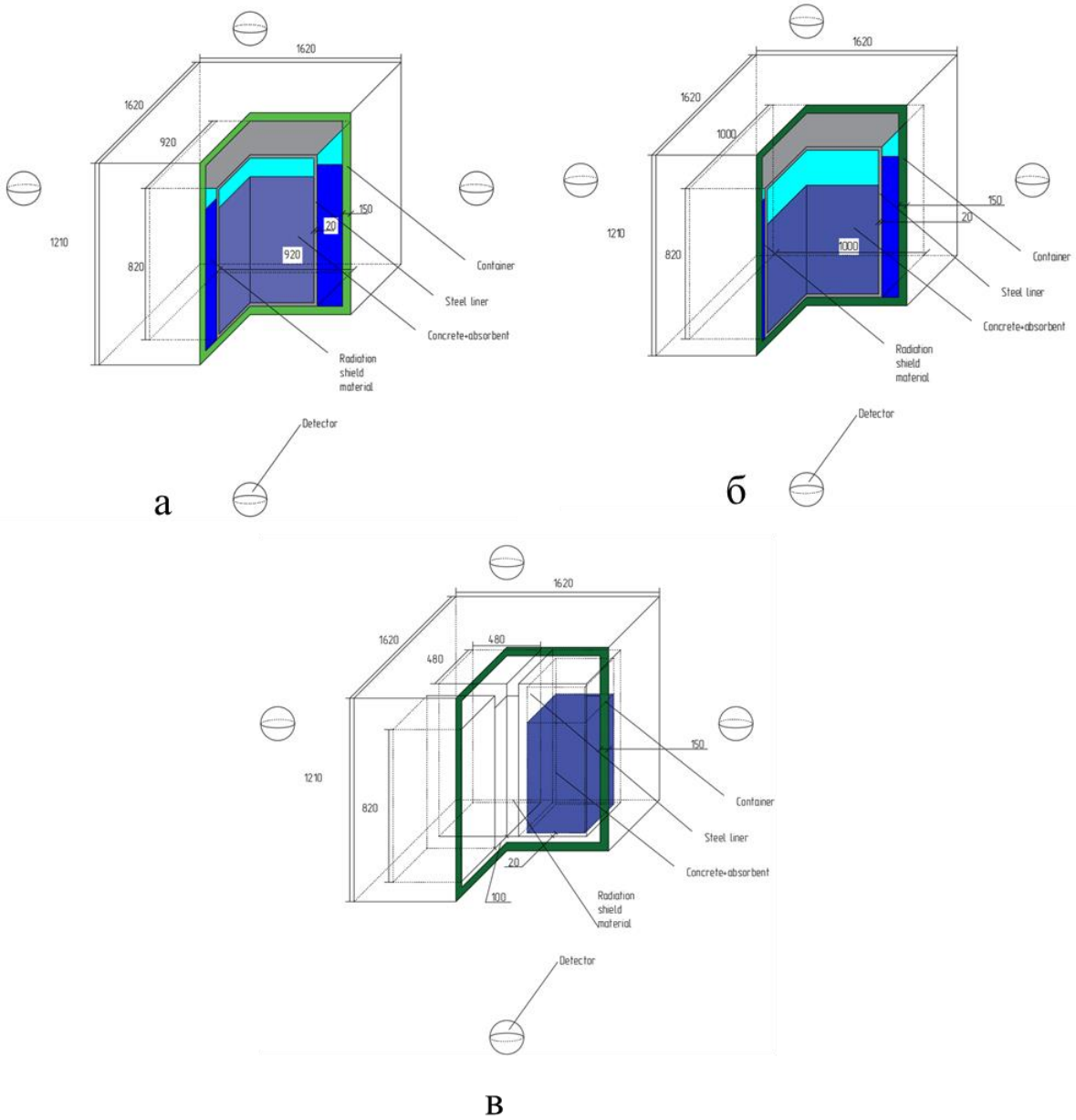


Рисунок 1 – Модели контейнера: а–со стальным вкладышем (геометрия №1, базовая); б – с уширенным стальным вкладышем (геометрия №2); в – с четырьмя стальными вкладышами, заполненными ЖРО (геометрия №3)

Пятый вариант геометрии является аналогом варианта геометрии №3, в которой стальные вкладыши расположены вплотную друг к другу и сосредоточены в центре контейнера. Загрузка ЖРО при этом не изменяется. Геометрия представлена на рисунке 2,б.

В шестом варианте геометрии внутрь контейнера размещаются 5 стальных вкладышей, расположенных в шахматном порядке. Их габариты также были уменьшены. В полостях контейнера между вкладышами располагаются радиационно-защитные материалы. Геометрия представлена на рисунке 2,в.

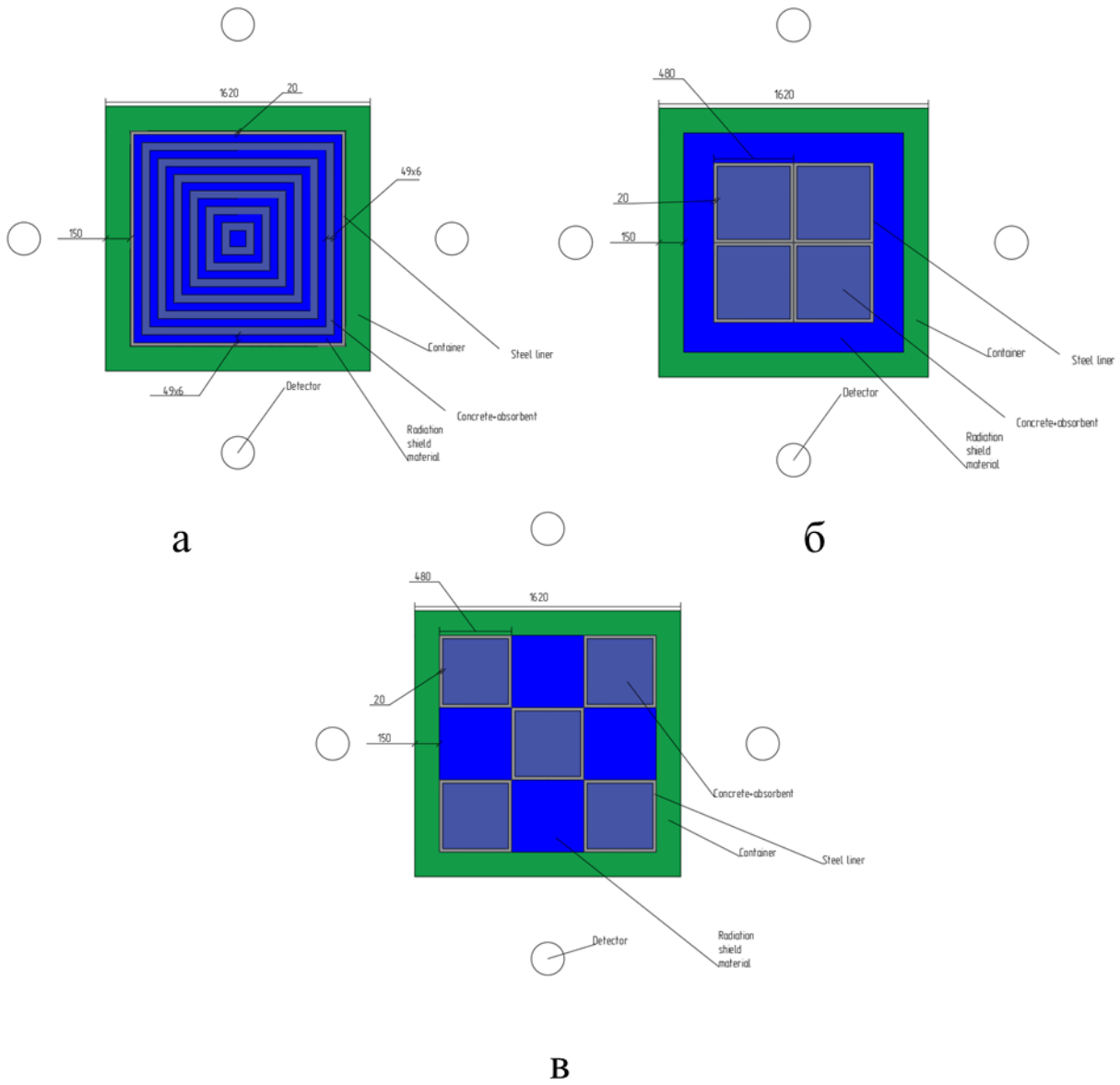


Рисунок 2 – Модели контейнера: а–с чередованием слоёв материала и источника (геометрия №4); б – с плотным расположением четырех стальных вкладышей, содержащих отходы (геометрия №5); в – модель контейнера с шахматным расположением стальных вкладышей с ЖРО (геометрия №6)

Наконец, в седьмом варианте геометрии источника рассматривается стальной вкладыш с раздельными секциями для упаковки цементной матрицы ЖРО. В каждую из полостей в равном количестве размещаются отходы, размеры секций были выбраны из этого условия. Более того в каждой новой секции высота матрицы увеличивалась на 25 % от предыдущей. Оставшаяся незанятая полость в секциях заполнялась радиационно-защитным материалом. На рисунке 3 показа геометрия расположения.

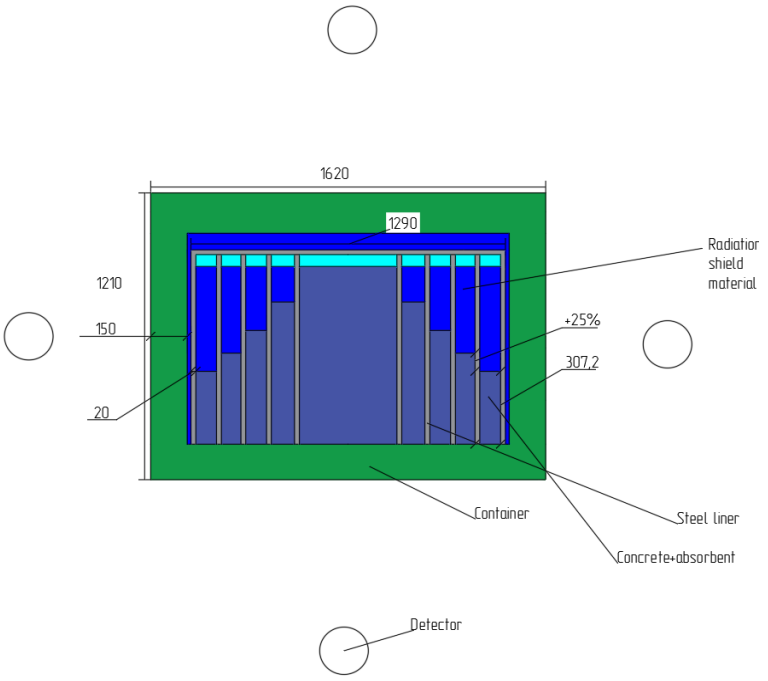


Рисунок 3 – Модель контейнера со стальным вкладышем с несколькими секциями (геометрия №7)

Результаты и обсуждение

В таблице 4приводятся результаты радиационной задачи для представленных геометрий источника с различным составом радиационно-защитного материала. На рисунке 4 представлена объёмная диаграмма значений мощности дозы в зависимости от типа геометрии используемого радиационно-защитного материала.

Решающую роль в выборе оптимального состава радиационной защиты играет плотность. Среди всех кандидатных материалов самой низкой обладает зола. Поэтому результаты радиационной задачи для данной защиты оказываются выше, чем для других материалов. Тем не менее, для источника с геометрией №1 и №5 оказывается возможным применение золы, поскольку мощность дозы не превосходит требуемое значение 40 мкЗв/ч, более того позволит немного увеличить объём загрузки цементированных ЖРО внутрь вкладыша.

Таблица 4 – Мощность дозы на расстоянии 1 м от поверхности контейнера, мкЗв/ч

Материал	Геометрия						
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7
Бетон	9,11	21,31	27,49	86,47	11,83	171,10	69,8
Зола	29,36	48,91	58,09	124,25	35,46	171,81	79,7
Золобетон	17,89	35,22	42,93	104,27	24,13	169,99	74,67
Гранатовый песок	8,89	21,75	26,03	86,64	11,62	164,07	71,43
Погрешность расчётов: не более 15%							

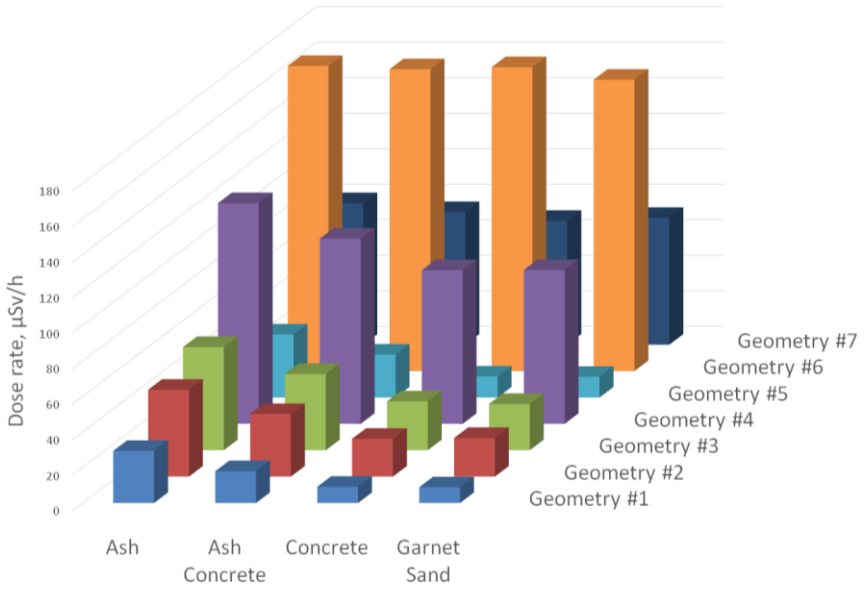


Рисунок 4 – Диаграмма мощности дозы в различных моделях задачи

Гранатовый песок по результатам расчёта показывает себя как наиболее перспективный радиационно-защитный материал, поскольку его плотность высока (насыпная превосходит даже плотность цемента). Однако, его стоимость в несколько раз превосходит стоимость цемента, таким образом, ограничивается широкая возможность его использования. Гранатовый песок может послужить в качестве наполнителя для изготовления более массивной радиационной защиты(например, добавка в бетон, по аналогии с золобетонами).

Золобетон, упакованный в цементную матрицу, позволяет сильнее снизить мощность дозы от поверхности контейнера, чем зола. Поэтому, более целесообразно использовать золу в качестве добавки, как это представлено в настоящей работе.

Рассматривая различные варианты геометрии источника, можно установить, что снижение мощности дозы достигается посредством близкого размещения друг к другу ЖРО, этому соответствует геометрия №1. Особое внимание стоит обратить на геометрию №6 и №7. По результатам расчёта можно утверждать, что при размещении источника, представленных на рисунках, радиационная защита перестаёт выполнять свою функцию, т.е. при замене материала мощность дозы практически не изменяется (значения разнятся в пределах погрешности). В этих случаях ослабление происходит за счёт конструкционных материалов вкладышей, матрицы ЖРО и стенок контейнера.

Заключение

Расчетно-экспериментальные исследования композитных радиационно-защитных материалов направлены на реализацию одного из основных принципов радиационной защиты – принципа оптимизации и имеют значительный потенциал в

сокращении затрат на всех этапах жизненного цикла ОИАЭ, начиная с проектирования и сооружения, заканчивая снятием с эксплуатации.

Расчетные исследования радиационных параметров контейнеров с различными вариантами размещения цементного компаунда, содержащего сорбент с радиоактивными изотопами, позволяют оптимизировать состав радиационной защиты. Теоретически возможно использование продуктов другой промышленности или отходов в качестве радиационной защиты. Наиболее эффективно выполняет свои радиационно-защитные функции материал, когда источник сосредоточен в центре контейнера. Дальнейшее их концентрация в одном месте позволит уменьшить мощность дозы, что позволит усовершенствовать технологию сбора ЖРО (увеличить удельную концентрацию радионуклидов на единицу массы сорбента).

Полученные результаты будут использованы при проведении экспериментальных работ по кондиционированию ЖРО. Результаты эксперимента позволят произвести верификацию расчетной модели.

Библиографический список

1. Наумов А. А. Минимизация дозовых затрат при ремонтном обслуживании систем и оборудования АЭС / А. А. Наумов, О. Л. Ташлыков // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. – Вып. 1. – С. 80–88.
2. Ташлыков О. Л. Дозовые затраты персонала в атомной энергетике. Анализ. Пути снижения. Оптимизация : монография / О. Л. Ташлыков. – Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2011. – 232 s.
3. Ташлыков О. Л. Методы оценки и снижения дозовых нагрузок при ремонте АЭС / О. Л. Ташлыков : учеб. пособие. – Екатеринбург : УГТУ–УПИ, 2009. – 118 с.
4. Оптимизация состава гомогенных радиационно-защитных материалов применительно к планируемым условиям облучения / О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин, И. М. Русских [и др.] // Атомная энергия. – 2016. – Т. 121, вып. 4. – С. 233–236.
5. Экспериментально-теоретическое исследование органометаллических радиационно-защитных материалов, адаптированных к источникам излучения со сложным изотопным составом / И. М. Русских, Е. Н. Селезнев, О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин. – DOI 10.1134/S207956291405008X // Ядерная физика и инжиниринг. – 2014. – Т. 5, вып. 5. – С. 449–455.
6. Экспериментальное исследование защит от гамма-излучения органометаллических композиций / О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин, А. П. Хомяков [и др.] // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – № 2 (15). – С. 49–55.
7. Расчетно-экспериментальное исследование гомогенных защит от гамма-излучения / О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин, А. П. Хомяков [и др.] // Ядерная и радиационная безопасность. – 2015. – № 3 (77). – С. 17–24.
8. Михайлова А. Ф. Пути реализации принципа оптимизации в радиологической защите персонала / А. Ф. Михайлова, О. Л. Ташлыков // Ядерная физика и инжиниринг. – 2018. – Т. 9, вып.4. – С. 393–401.

9. Литовченко В. Ю. Расчетное обоснование радиационных параметров защитного контейнера с цементным компаундом, содержащим сорбент с изотопами цезия-137 и кобальта-60 / В. Ю. Литовченко, Н. А. Васютин, О. Л. Ташлыков // Ядерные технологии: от исследований к внедрению – 2019 : сб. материалов науч.-практ. конф. (Нижний Новгород, 17–18 окт. 2019 г.). – Нижний Новгород, 2019. – С. 85–86.
10. Modeling radiation protection of containers for transporting isotopes with high-energy beta irradiation / V. Yu. Litovchenko, N. A. Vasutin, O. L. Tashlykov [et al.]. – DOI 10.1063/1.5134285 // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2174, Iss. 1. – P. 020134.
11. Investigation of radiation shielding properties for some building materials reinforced by basalt powder / K. A. Mahmoud, O. L. Tashlykov, A. F. Wakil [et al.]. – DOI 10.1063/1.5134187 // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2174, Iss. 1. – P. 020036.
12. Mahmoud K. A. Gamma ray shielding characteristics and exposure buildup factor for some natural rocks using MCNP-5 code / K. A. Mahmoud, M. I. Sayyed, O. L. Tashlykov. – DOI 10.1016/J.NET.2019.05.013 // Nuclear Engineering and Technology. – 2019. – Vol. 51, Iss. 7. – P. 1835–1841.
13. Моделирование радиационной защиты контейнеров для транспортировки высокоэнергетических бета-источников / В. Ю. Литовченко, Н. А. Васютин, О. Л. Ташлыков [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Материаловедение и новые материалы». – 2019. – Вып. 5 (101). – С. 4–12.
14. Особенности вывода из эксплуатации быстрых реакторов БН-350, -600/ Ю. В. Носов, А. В. Ровнейко, О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин // Атомная энергия. – 2018. – Т. 125, вып. 4. – С. 195–199.
15. Повышение эффективности локализации радионуклидов кобальт-60 и цезий-137 из жидких радиоактивных отходов в решении проблемы обеспечения радиационной безопасности АЭС / В. П. Ремез, О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин [и др.]. – DOI 10.1134/S2079562916020135 // Ядерная физика и инжиниринг. – 2016. – Т. 7, вып. 2. – С. 129–137.
16. Расчетные методы оптимизации радиационной защиты контейнеров для хранения твердых радиоактивных отходов / Н. А. Васютин, Е. О. Семёнова, А. Ф. Михайлова, О. Л. Ташлыков // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : материалы Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с междунар. участием (Екатеринбург, 12–16 дек. 2016 г.). – Екатеринбург, 2016. – С. 349–352.
17. Применение золы и золошлаковых отходов в строительстве / Н. И. Ватин, Д. В. Петросов, А. И. Калачев, Лахтинен Пентти. – DOI 10.5862/MCE.22.2 // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – Вып. 4. – С. 16–21.

УДК 621.039

Литвинов Д.Н., Костарев В.С., Ширманов И.А., Щеклеин С.Е., Мищихин А.А.

МАЛОГАБАРИТНАЯ АЭС МАЛОЙ МОЩНОСТИ С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ ДЛЯ АРКТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Аннотация. менее 5% площади земного шара охвачено централизованным сетевым энергоснабжением. В локальных энергоузлах нуждается не только северная территория России, но и северные территории некоторых стран Азии, Гренландии, Южной Америки, Канады, Австралии и Африки. Одним из потенциальных сценариев покрытия энергетического дефицита предлагается использования атомных станций малой мощности. СВБР – один из типов реакторов, обладающих малой мощностью и подходящих под условия размещения в арктической зоне. Для анализа работы атомной станции с реактором СВБР-100 было проведено моделирование различных вариантов его тепловых схем при различных параметрах пара при помощи САПР United Cycle с целью нахождения наиболее оптимального термодинамического цикла.

Ключевые слова: СВБР-100, арктические условия, тепловой расчёт, ЯЭУ, United Cycle.

Abstract. less than 5% of the world's area is covered by centralized grid power supply. Local power centers are needed not only in the northern territory of Russia, but also in the northern territories of some countries of Asia, Greenland, South America, Canada, Australia, and Africa. One of the potential scenarios for covering the energy deficit is the use of low-capacity nuclear power plants. SVBR is one of the types of reactors with low power and suitable for placement in the Arctic zone. To analyze the operation of a nuclear power plant with an SVBR-100 reactor, various variants of its thermal schemes were simulated with various steam parameters using United Cycle CAD systems in order to find the most optimal thermodynamic cycle.

Keywords: SVBR-100, Arctic conditions, nuclear propulsion.

Введение

Рост объёма добычи и переработки полезных ископаемых ограничен дефицитом энергии в регионах, поскольку освоение районов Дальнего Востока России, Крайнего Севера России и Арктики напрямую зависят от качества и бесперебойности подачи энергоснабжения, а площадь этих районов без малого составляет 2/3 от общей территории страны и располагает обширными запасами природных ресурсов.

Однако несмотря на отсутствие централизованного энергоснабжения, в этих регионах присутствуют добывающие и перерабатывающие предприятия. Они вынуждены пользоваться привозным органическим топливом, которое, в связи с трудностью доставки в эти регионы и выработкой своего ресурса генерирующим оборудованием, влечет за собой рост издержек и снижение экономических показателей. [1]

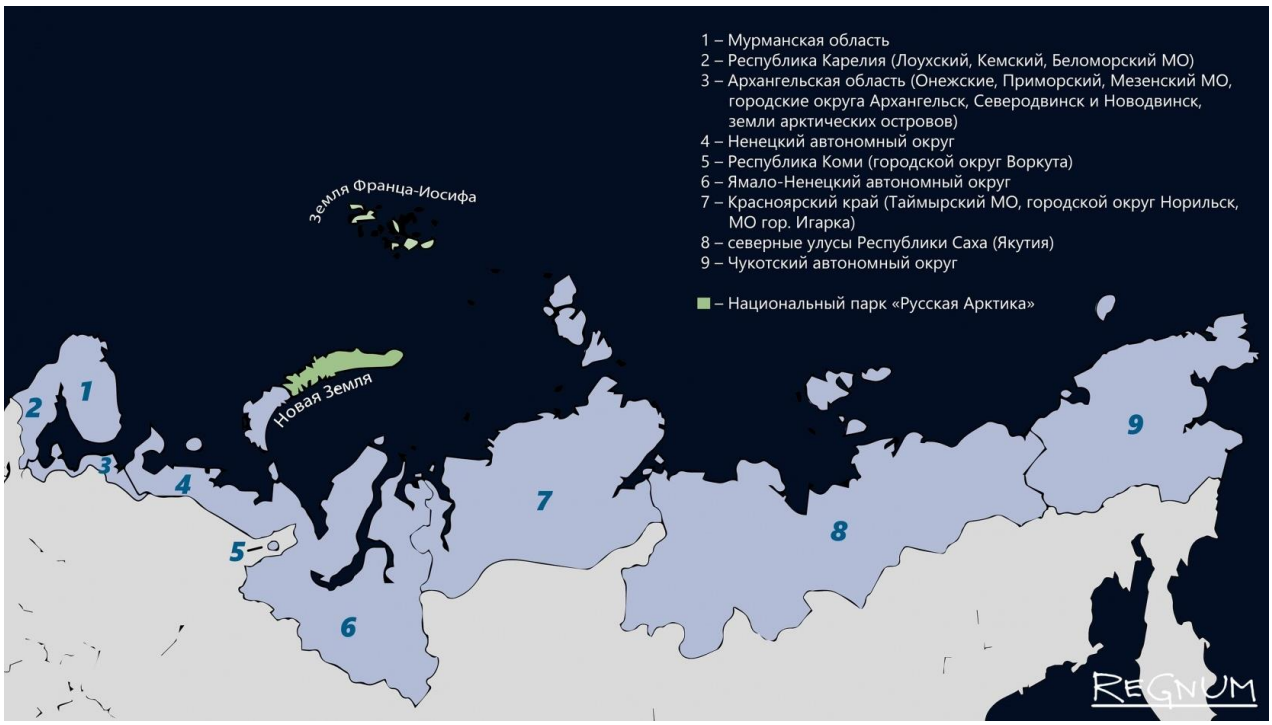


Рисунок 1 – Арктическая зона России.

В настоящее время энергоснабжение большинства Арктических территорий осуществляется дизель-электрическими станциями. На рисунке 2 показана карта размещения и выработки электрической энергии существующими ДЭС по данным [1].

Ежегодный завоз топлива для автономных ДЭС составляет более 1 млн. тонн. Себестоимость производимо энергии достигает 300-400 руб. за кВт-ч.

Развитие Арктических территорий в настоящее время осуществляется по трем основным причинам:

- освоение природных ресурсов территорий.
- обеспечение надежного функционирования портовой инфраструктуры Северного морского пути.
- обеспечение пограничных и военных объектов, расположенных на Арктических территориях.

Единственным способом удовлетворить потребность данных регионов в электроэнергии является внедрение локальных комплексов на базе АС малой мощности, поскольку природные и климатические условия данных регионов не позволяют повсеместно использовать электрогенерирующие мощности, основанные на преобразовании солнечной, ветровой или приливной энергии [1].

Особенности атомной энергетики в Арктической зоне

России принадлежит 21% всего шельфа Мирового океана. Около 70% его площади перспективны с точки зрения полезных ископаемых, в первую очередь нефти и газа. В апреле 2020 года Правительство Российской Федерации одобрило «Энергетическую стратегию Российской Федерации на период до 2035 года», в которой определено, что освоение углеводородного ресурсного потенциала континентального шельфа арктических морей и северных территорий представляет собой «важнейший геополитический и технологический вызов для нефтегазового комплекса России». [2]

В Арктике сконцентрировано большинство открытых в России уникальных месторождений углеводородов. По имеющимся оценкам суммарные извлекаемые запасы только арктического шельфа составляют не менее 7,3 млрд. тонн нефти и около 55 трлн. куб. метров – газа. [3] Согласно Стратегии, добыча углеводородов на российском шельфе будет играть важную роль в энергетическом балансе России, являясь необходимой для замещения падения добычи на действующих месторождениях за временным горизонтом 2035 года.

Вместе с тем, разработка и освоение шельфовых месторождений в Арктике требует нестандартных технических решений, обусловленных экстремальными климатическими условиями, отсутствием развитых логистических коммуникаций, большими экологическими рисками в условиях хрупкой с резко замедленным самовосстановлением природы Арктики и, главное, тяжёлой ледовой обстановкой. Наличие дрейфующего льда и айсбергов, удалённость месторождений от берега ограничивает возможности проведения буровых и иных морских работ. Решение этой задачи – высокотехнологичный процесс, который требует инновационного развития отраслей и видов деятельности, связанных с созданием средств разведки, поисков, добычи, транспортировки и переработки нефти и газа.

В этих условиях практически единственным решением является создание подводно-подлёдных автоматизированных систем обустройства месторождений, в состав которых должны входить системы разведки, добычные комплексы, установки подготовки продукта добычи к транспорту, компрессорные станции и т.д. Подводно-подлёдные системы обеспечивают решение технических задач освоения месторождений и минимизируют возможные экологические риски.

Базовым условием освоения ресурсного потенциала Арктического шельфа является создание высоконадёжной и безопасной системы энергообеспечения. [4,5] Одной из важнейших составляющих этой системы должна стать воздухонезависимая автономная система энергообеспечения подводно-подлёдных комплексов обустройства месторождений.

Такая система должна отвечать специфическим условиям эксплуатации и требованиям энергопотребителей:

- отсутствие инфраструктуры транспорта энергии;
- рассредоточенность добычных комплексов на больших пространствах;
- наличие протяжённых по времени (вплоть до круглогодичных) ледовых режимов в акватории Северного Ледовитого океана. Для обеспечения круглогодичного энергоснабжения добычного оборудования целесообразно использовать энергоисточники с подводным расположением;
- необходимость устойчивого энергообеспечения с длительностью генерации, равной времени работы потребителей – объектов обустройства месторождения, так как в подводных условиях ремонт и техническое обслуживание затруднены;
- необходимость наличия энергоисточников, независимых от подачи топлива и рабочих сред на протяжении длительного периода;
- необходимость обеспечения высокой автономности и манёвренности энергетических установок, гибко реагирующих на изменение нагрузки;
- крайняя ограниченность численности персонала для осуществления контроля, управления и технического обслуживания;
- необходимость наличия типоряда энергоисточников по генерируемой мощности и возможность мультиплицирования.

По возможности удовлетворения совокупности указанных условий автономные атомные энергоисточники являются весьма перспективными, а в некоторых случаях практически безальтернативными для энергообеспечения освоения Арктического шельфа [4,5].

Потенциальный сценарий использования атомной энергетики в Арктике

В настоящее время Россия занимает передовые позиции в мире в области разработки и создания малых модульных ядерных реакторов в широком диапазоне мощностей – от 100 кВт до 50 МВт (электрических). АЭС по критериям надежности, независимости от топливной составляющей и влиянию на экологию являются наиболее привлекательными энергетическими альтернативами. Существующие проекты АСММ характеризуются высокой степенью адаптивности их технико-экономических и эксплуатационных характеристик для решения проблем развития малой энергетики, из которых стоить выделить возможность подземного и надводного размещения, а также широкий спектр мощностей существующих проектов АСММ: от нескольких единиц до сотен МВт. [6]

Арктика обладает большим потенциалом для использования возобновляемых источников энергии. При этом эксперты считают, что наиболее перспективным альтернативным источником энергии в Арктике является ветер. Однако ветроустановки в Арктике требуют специального арктического низкотемпературного изготовления, это требование к материалам делает арктические ветроагрегаты существенно дороже обычных. Более дешевым и простым в обслуживании и эксплуатации возобновляемым источником являются солнечные установки, однако для полноценной работы таких станций не хватает солнечной энергии. Учитывая все эти факторы, можно констатировать, что «наиболее перспективными возобновляемыми источниками энергии Арктике являются энергетические комплексы с разным набором технологий: ядерная энергетика, ветер и солнце». [7]

Требования к ЯЭУ для Арктического использования:

1) Минимальный уровень капитальных затрат
2) Максимальный уровень безопасности
3) Возможность поэтапного наращивания мощности
4) Возможность теплофикационного использования
5) Минимальный расход технической воды (независимость от источника водоснабжения)
6) Максимальная продолжительность работы без перегрузки топлива
7) Возможно низкое обогащение топлива

Атомная станция с реактором на быстрых нейтронах со свинцово-висмутовым теплоносителем (СВБР)

СВБР – энергетические ядерных реакторы, имеющие малую мощность, принцип работы которых основан на быстрых нейтронах, в которых используется свинцово-висмутовый теплоноситель (СВТ).

Как было сказано выше, Россия имеет уникальный опыт проектировки, создание и эксплуатации реакторных установок на быстрых нейтронах. На сегодняшний день в России разрабатываются реакторные установки типа СВБР с малыми мощностями (10-40 и 100-400 МВт). Принцип энергоблока – модульный. Наилучшим образом на данный момент прорабатывается проект СВБР-100. [8]

Реакторы имеют высокий уровень пассивной безопасности и внутренней самозащищённости [9] благодаря:

– использованию свинцово-висмутовый теплоноситель;
– сплав свинца и висмута химически инертен по отношению к газам воздуха и к воде, при использовании данного сплава не выделяется водород, это, в

свою очередь, полностью исключает риски возникновения химических взрывов;

- имеет способность удерживать продукты деления (J, Cs, и др. за исключением инертных газов), что уменьшает возможность и тяжесть утечек радиоактивных материалов в окружающую среду;
- высокая температура кипения (~1670 °C) (температура плавления свинцово-висмутового теплоносителя – 124°C) и большая теплоёмкость СВТ исключает аварии, возникающие из-за кризиса теплообмена (уровень естественной циркуляции теплоносителя достаточен для расхолаживания реакторной установки из любого исходного состояния);
- использованию интегральной компоновки, при которой активная зона, оборудование первого контура и модуль испарителя размещены в едином прочном корпусе реакторного моноблока с полным исключением арматуры и трубопроводов свинцово-висмутового теплоносителя. Тракт теплоносителя организован таким образом, что исключается попадание воды-пара в активную зону при течи теплообменной поверхности модуля испарителя в корпусе МБР;
- низкое давление в первом контуре исключает утечки из первого во второй контур. Обеспечивает низкий запас потенциальной энергии в первом контуре, уменьшая возможность и тяжесть механических повреждений при авариях;
- нейтронным характеристикам быстрого реактора;
- низкий оперативный запас реактивности (меньше доли запаздывающих нейтронов) исключает возможность разгона реактора на мгновенных нейтронах при несанкционированном извлечении любого рабочего стержня;
- малое значение отрицательного температурного коэффициента реактивности;
- небольшой запас реактивности на выгорание;
- отсутствие эффектов отравления.

Благодаря развитым свойствам внутренней самозащищенности существенно, в сравнении с традиционными реакторными установками, уменьшены количество и сложность систем безопасности, при этом, функции безопасности возложены, в основном, на системы нормальной эксплуатации; основные компоненты реакторного моноблока и РУ выполнены в виде отдельных модулей, при этом обеспечена возможность их замены и ремонта; оборудование реакторной установки проектируется исходя из требования обеспечения его

сейсмостойкости и работы ОПЭБ в маневренном режиме с суточным изменением мощности в пределах 50-100% со скоростью 0,5-2% $N_{ном}$/мин. [10]

Реакторы также могут использовать ядерное топливо различных видов (на оксиде урана, смешанных нитридах, смешанных оксидах) и работать в замкнутом ядерном топливном цикле.

Таблица 1 – Основные характеристики реакторов СВБР-10 и СВБР-100.

Наименование параметра	СВБР-10	СВБР-100
Мощность РУ тепловая, МВт	43,3	280
Мощность РУ электрическая (брутто), МВт	12	101,5
Давление генерируемого пара, МПа	4,2 (перегретый пар 410°С)	9,5 (насыщенный пар 307°С или перегретый пар 400°С)
Температура СВТ, вх/вых, °С	320 / 480	320 / 482
Топливо: тип, среднее обогащение по U-235,%	UO_2 18,7	UO_2 16,5
Кампания активной зоны, тыс. эфф.ч	135	53
Интервал времени между перегрузками, лет	15-20	7-8

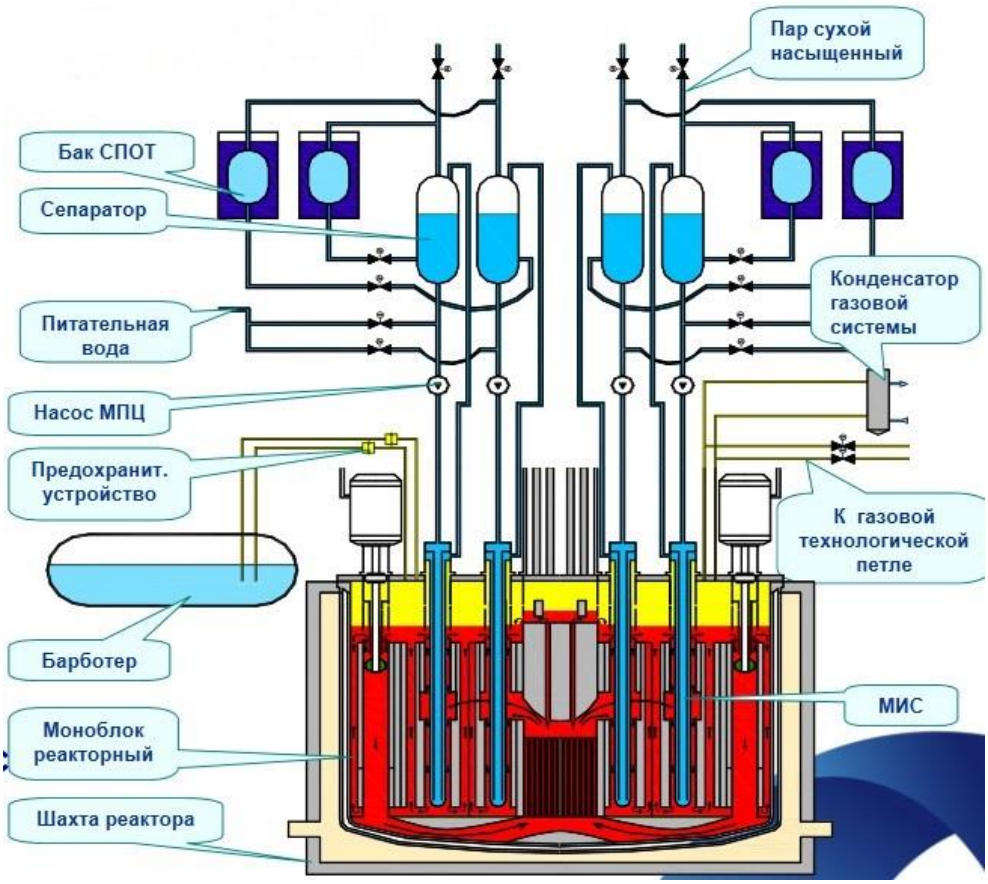


Рисунок 2 – Принципиальная схема реакторной установки СВБР-100

Принципиальная схема реактора предусматривает:

- тракт теплоносителя первого контура, сформированный внутри корпуса реакторного моноблока без трубопроводов и арматуры;
- четыре петли второго контура с вертикальными сепараторами насосами многократной принудительной циркуляции (МПЦ);
- газовую систему для поддержания инертной атмосферы над уровнем теплоносителя первого контур;
- система пассивного отвода тепла (СПОТ);
- 2 барботера для приема парогазовой смеси из МБР при межконтурной течи модуля испарителя.

Использование свинцово-висмутового теплоносителя

Свинцово-висмутовый теплоноситель имеет ряд преимуществ. Во-первых, по сравнению с жидкометаллическими теплоносителями на основе натрия, используемыми в реакторах типа БН, такими как жидкий натрий или натриево-кальциевый сплав, СВТ имеют значительно более высокие точки кипения, из чего следует, что эксплуатация реактора не имеет риска закипания теплоносителя при гораздо более высоких температурах. Следовательно, улучшается термический КПД, а также это потенциально может позволить производство водорода с помощью термохимических процессов.

Во-вторых, свинцово-висмутовый теплоноситель химически инертен и не вступает в реакцию с водой или газами воздуха в отличие от тех же натрия и натриево-кальциевого сплава, которые самовоспламеняются на воздухе и взрывоопасно реагируют с водой. Из этого следует, что реакторы, в которых используется СВТ, в отличие от конструкций с натриевым охлаждением, не нуждаются в промежуточном контуре теплоносителя, что значительно снижает капитальные вложения на установку.

В-третьих, поскольку в состав сплава СВТ входит свинец и висмут, он, сам по себе, является отличной защитой от гамма-излучения, однако является «прозрачным» для нейтронов. В сравнении натрий образует мощный гамма-излучатель натрия-24, чей период полураспада составляет 15 часов, после интенсивного нейтронного излучения, что требует большой радиационной защиты для первичного контура охлаждения, что также удорожает капиталозатраты на реакторную установку.

В-четвертых, использование свинцово-висмутового теплоносителя не требует создания давления в реакторе даже при высоких температурах ввиду высокой температуры кипения сплава. Исходя из этого, можно сделать вывод, что использование СВТ позволяет создавать пассивно безопасные конструкции.

Несмотря на преимущества, для свинцово-висмутового теплоносителя имеются некоторые недостатки, а точнее – ограничения, которые должны соблюдаться при использовании данного теплоносителя.

Во-первых, СВТ является более коррозийным для стали, чем натрий, что устанавливает верхний предел скорости потока теплоносителя через реактор из соображений безопасности.

Во-вторых, более высокие температуры плавления свинцово-висмутового теплоносителя могут быть более серьезной проблемой в случае затвердевание хладагента, когда реактор работает при более низких температурах. Следовательно, нельзя допускать работу реактора в условиях температур ниже температуры замерзания сплава свинец-висмут.

Наконец, в-третьих, при нейтронном излучении висмут-209, основной стабильный изотоп висмута, присутствующий в СВТ, подвергается нейтронному захвату и последующему бета-распаду, образуя полоний-210, мощный альфа-излучатель. Присутствие радиоактивного полония в теплоносителе потребует специальных мер предосторожности для контроля альфа-загрязнения во время перегрузки реактора и обращения с компонентами, контактирующими со свинцово-висмутовым теплоносителем.

Тепловой расчёт принципиальной схемы АЭС с РУ СВБР-100

Данные расчёты проведены в специальной программе United Cycle (UC). За основу расчётов были взяты схемы-аналоги существующих решений.

Пакет UC предназначен для решения задач определения наилучших структуры и состава оборудования теплоэнергетического объекта и расчета стационарных эксплуатационных режимов работы.

Целью проектных или поверочных тепловых расчетов является получение технико-экономических показателей работы турбоустановок, необходимых для выбора наилучших параметров, профиля и структуры тепловой схемы.

Пакет UC строится на алгоритме, в котором решение системы нелинейных уравнений ищется в едином итерационном процессе без разбиения исходного графа на подграфы. Этот алгоритм учитывает специфику изменения параметров в графе, соответствующем технологическому процессу, и обеспечивает решение системы уравнений во всем диапазоне эксплуатационных нагрузок не только отдельного энергоблока, но и всей электростанции в целом.

Экологическая оценка РУ СВБР-100

Рассмотрим воздействие реакторной установки СВБР-100 на окружающую среду и персонал как реактора на быстрых нейтронах.

Реакторы на быстрых нейтронах обладают рядом преимуществ [11]:

- возможность работать на низких (близких к атмосферному) давлениях в реакторе, что значительно снижает риск выброса радиации;
- высокая тепловая эффективность и надежность оборудования реакторного контура (отсутствие коррозии и отложений на поверхности ТВЭЛов);
- возможность получения высоких температур теплоносителя, что увеличивает термодинамическую эффективность АЭС;
- минимальный начальный запас реактивности, который практически исключает возможность возникновения ядерно-опасных событий;
- минимальный объём технологических отходов (10-20 м3/год);
- радиационная нагрузка на персонал в 10-100 раз меньше, биоэкологическое воздействие – отсутствует;
- наиболее эффективное использование ядерного топлива (выгорание в 2–2,5 раза) среди всех типов АЭС;
- возможность увеличения производства (воспроизводства) ядерного топлива. [12]

Говоря конкретно о реакторной установке СВБР-100, необходимо отметить, что загрязнение окружающей среды стоками, содержащими радионуклиды, при эксплуатации реактора отсутствует. Сбросные регенерационные воды установки очистки конденсата (в том числе и случайные протечки, и проливы химрастворов), содержащие катионы металлов и анионы кислотных остатков, свободную серную кислоту и едкий натр, направляются в баки-нейтрализаторы химводоочистки. Очищенные воды используются в оборотном цикле РУ СВБР-100. Водопотребление при оборотной системе охлаждения предназначено для подпитки с целью компенсации потерь воды в охладительных устройствах на испарение и унос, а также на продувку системы, величина которой зависит от качества воды в источнике водоснабжения и от принятых методов обработки исходной воды.

Достаточно жесткие пределы соблюдаются для газообразных выбросов. В основу проектирования вентиляции АЭС с реакторной установкой СВБР-100 заложены следующие принципиальные решения:

- раздельная вентиляция помещений зоны контролируемого доступа (ЗКД);
- раздельная вентиляция помещений зоны свободного доступа (ЗСД);
- организация направленного движения воздуха только в сторону более «грязных» помещений;
- установка герметичных дверей в технологических помещениях зоны строгого режима с радиоактивными средами;

– создание нормальных условий для ремонтного персонала при проекте производства работ и перегрузочных работах;
– в случае удаления воздуха перед выбросом в атмосферу проходит очистку от радиоактивных аэрозолей на аэрозольных фильтрах, благодаря чему обеспечивается низкий уровень радиоактивных аэрозолей в газообразном вентиляционном выбросе. [13]

Нерадиоактивные отходы подлежат вывозу на полигон промышленных отходов.

Результаты и обсуждение

Исходя из результатов проведённых расчётов можно заметить, что при одном и том же расходе топлива в проекте реакторной установки на перегретом паре получаем в ~1,5 раза больше электрической мощности, то есть электроэнергии. Следовательно, проект реакторной установки на перегретом паре является более привлекательным.

Из рассмотренных вариантов наиболее полно поставленной задаче отвечает реактор, работающий с паровой турбиной на перегретом паре, поскольку КПД ПТУ по производству электроэнергии у него выше в 1,5 раза, электрическая мощность его превышает электрическую мощность реактора, работающего с паровой турбиной на насыщенном паре, также в 1,5 раза, при этом удельный расход тепла, передаваемого технической воде, меньше в 1,7 раза, следовательно, работающий с паровой турбиной на перегретом паре реактор при максимальной мощности имеет минимальный расход воды. Отсюда следует, что лучшим в условиях Арктического размещения является реактор, работающий с паровой турбиной на перегретом паре.

В таблице 3 представлены параметры пара в расчётных точках паротурбинного цикла, а также коэффициент полезного действия ступеней турбины.

Таблица 2 – Сравнение термодинамических характеристик тепловых схем АЭС с РУ СВБР-100 на насыщенном и перегретом паре

Параметр	Насыщенный пар	Перегретый пар
Тепловая мощность реактора, МВт	300	300
Расход, кг/с	111	111
Давление, бар	31.79	218
Температура, ^{0}С	284	530
КПД электрогенератора, %	98.5	98.5
Внутренняя мощность ПТУ, МВт	64.79	98.26
Внутренняя мощность ПТУ (брутто), МВт	63.82	96.79
Удельный расход теплоты на выработанную ПТУ, кДж/кВт*ч	13592	8886
КПД ПТУ по производству э/э, %	26.49	40.51
Затраты мощности на собственные нужды (абс), МВт	1.07	3.2
Затраты мощности на собственные нужды (отн), %	1.67	3.31
Электрическая мощность ПТУ (нетто), МВт	62.75	93.58
Удельный расход теплоты на отпущенную ПТУ, кДж/кВт*ч	13824	9190
КПД ПТУ по отпуску, %	26.04	39.17

Таблица 3 – Полученные параметры пара на расчётных точках тепловых схем паротурбинного контура

№	Перегретый пар				Насыщенный пар			
	P, кг/см^2	T, ^{0}С	h, Ккал/кг	η, %	P, кг/см^2	T, ^{0}С	h, Ккал/кг	η, %
1	222,9	530	791		32	284	704	
2	57,2	328	715	87	14,7	202	670	85,8
3	36,1	273	693	85	6,98	168	662	23,6
4	16,5	202	659	87	2,78	130	626	90,3
5					2,68	129	626	
6	16,5	226	683		2,68	157	664	
7	10,2	180	663	87	1	99	627	89
8	0,06	36	536	70	0,06	36	571	58,6

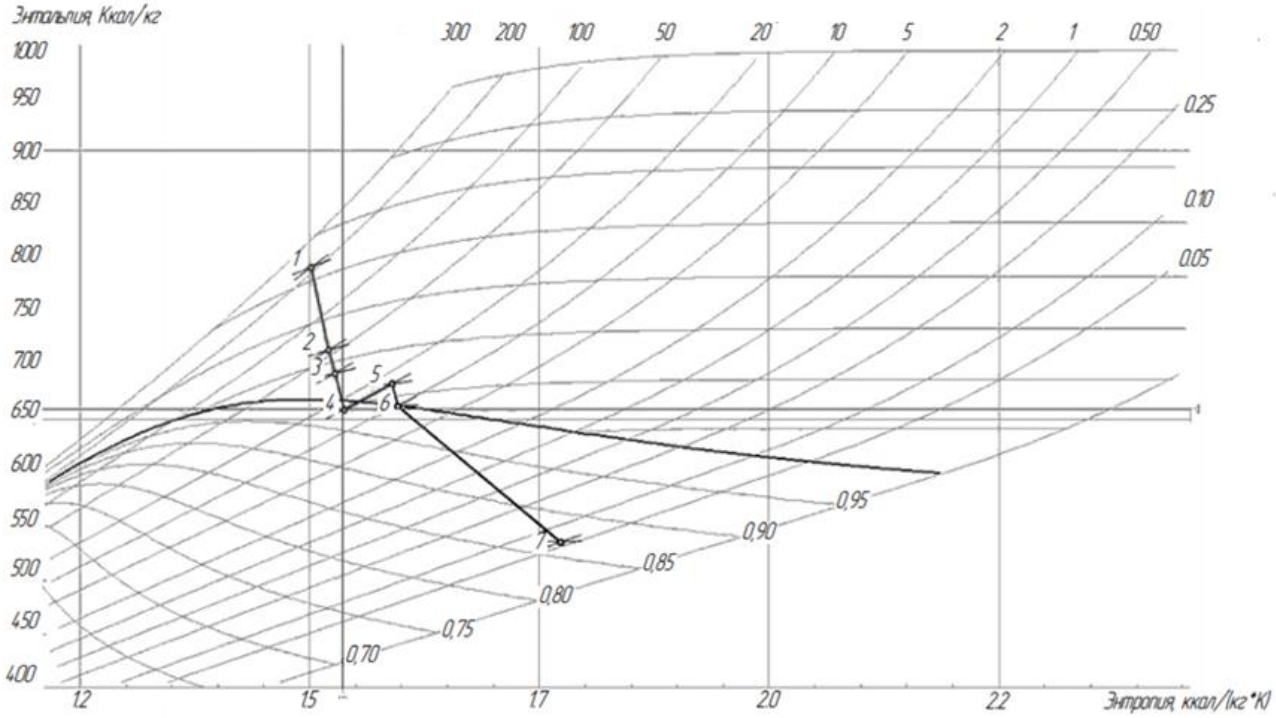


Рисунок 3 – Термодинамическая диаграмма процессов работы АЭС на перегретом паре

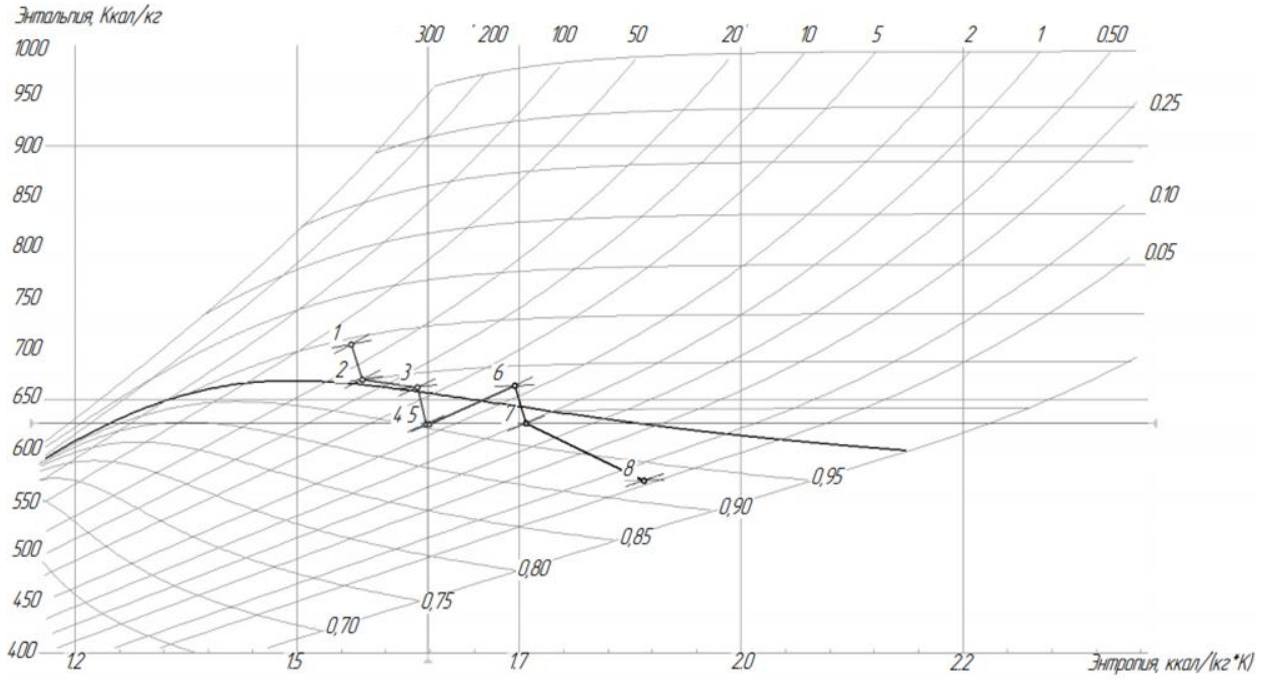


Рисунок 4 – Термодинамическая диаграмма процессов работы АЭС на насыщения

Заключение

В данной работе приведены варианты расчётов принципиальных тепловых схем энергоблока АЭС с реактором СВБР-100 (с насыщенным и перегретым паром).

Особое внимание было уделено реактору СВБР-100, его техническим характеристикам, режимам работы, преимуществам перед реакторами, в которых используются другие виды теплоносителя, также рассмотрели его с точки зрения экологии и безопасности. В работе также была представлена принципиальная схема, компоновка и продольный разрез СВБР-100.

Были сформулированы специфические требования к ядерной энергоустановке для использования в Арктическом регионе.

По результатам проделанной работы можно сделать вывод о том, что РУ СБВР – результат аккумуляции опыта проектировки и эксплуатации ядерных энергоустановок. Реакторная установка СВБР-100 с перегретым паром наиболее полно удовлетворяет требованиям АЭС для размещения в Арктическом регионе.

Библиографический список

1. Пименов А. О. Энергообеспечение в Арктике / А. О. Пименов, Д. Г. Куликов, Е. Н. Гольцов, Г. И. Гречко // Neftegaz.RU. – 2018. – № 1. – С. 24–29.
2. Ковальчук М. В. Инновационная атомная энергетика в преддверии шельфовых проектов в Арктике / М. В. Ковальчук, О. С. Нарайкин, В. С. Устинов [и др.] // Neftegaz.RU. – 2020. – № 5. – С. 26–30.
3. Кобылкин Д. Н. Ресурсы арктического шельфа – это наш стратегический запас / Д. Н. Кобылкин // Энергетическая политика : общ.-деловой науч. журн. – URL: https://energypolicy.ru/resursy-arkticheskogo-shelfa-eto-nash/business/2019/22/14/ (дата обращения: 06.06.2021).
4. Ковальчук М. В. Арктический вектор энергетики России / М. В. Ковальчук // XXII Александровские чтения, 15 февраля 2016 года : материалы конф., посвящ. 113-й годовщине со дня рождения акад. А. П. Александрова. – Москва, 2016. – С. 37–42.
5. Ковальчук М. В. Арктический вектор энергетики России / М. В. Ковальчук // Природа. – 2016. – № 9. – С. 24–31.
6. Смоленцев Д. О. Развитие энергетики Арктики: проблемы и возможности малой генерации / Д. О. Смоленцев // Арктика: экология и экономика. – 2015. – № 3 (7). – С. 22–29.
7. Альтернативная энергия Арктики. – URL: http://arctic-centre.com/ru/analitika/item/197-alternativnayaenergiya-arktiki (дата обращения 25.12.2020).
8. СВБР // Википедия : свобод. энцикл. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/СВБР (дата обращения: 20.12.2020).
9. Климов Н. Н. Свинцово-Висмутовые быстрые реакторы для атомных станций малой и средней мощности / Н. Н. Климов // Международный форум «АТОМЭКСПО 2009» 26–28 мая 2009 г. – Москва, 2009. – С. 33.
10. Реакторная установка СВБР-100 для модульных атомных станций малой и средней мощности / Н. Н. Климов, В. В. Джангобегов, В. С. Степанов [и др.]. – URL:

http://www.gidropress.podolsk.ru/files/publication/publication2013/documents/245.pdf (дата обращения: 20.12.2020).
11. Ecological features of fast reactor nuclear power plants (NPPs) at all stages of their life cycle / O. Tashlykov, S. Shcheklein, A. Sesekin [et al.] // WIT Transactions on Ecology and the Environment. – 2014. – Vol. 190 : 1st International Conference on Energy Production and Management in the 21st Century: The Quest for Sustainable Energy (Ekateringburg, 23–25 Apr 2014). – P. 907–918.
12. Ecological foresight in the nuclear power of XXI century / O. Tashlykov, S. Shcheklein, O. Smyshlaeva, Y. Nosov. – DOI 10.2495/EQ-V1-N2-133-140 // International Journal of Hydrogen Energy. – 2016. – Vol. 1, Iss. 2. – P. 133–140.
13. Оценка воздействия на окружающую среду при сооружении опытно-промышленного энергоблока с реакторной установкой на быстрых нейтронах со свинцово-висмутовым теплоносителем в Ульяновской области. – Ульяновск, 2014. –URL: http://svbr.org/assets/files/OVOS/OVOS_soo_kn6.pdf (дата обращения: 20.12.2020).

УДК 338.2:001.895

Шалина Д.С., Степанова Н.Р.

AGILE ПОДХОД В ПРОЦЕССЕ КОММЕРЦИАЛИЗАЦИИ ИННОВАЦИОННЫХ РАЗРАБОТОК

Аннотация. Мы предлагаем использовать гибкий подход в процессе коммерциализации научных и инновационных разработок. Гибкий подход позволит оптимизировать эффективное развитие инновационной деятельности. Заявка рассматривается на разных уровнях – это организация, например, университеты, страна, и мировое сообщество.

Ключевые слова: agile, инновации, коммерциализация.

Abstract. We propose to use a flexible approach in the process of commercialization of scientific and innovative developments. A flexible approach will optimize the effective development of innovation activities. The application is considered at different levels – this is an organization, for example, universities, a country, and the world community.

Keywords: agile, innovation, commercialization.

Введение

С каждым годом инновации приобретают все большее распространение и становятся условием устойчивого развития предприятий, отраслей и экономики в целом [1].

Инновационная деятельность в России находится в состоянии стагнации. Россия занимает 47 место по уровню глобального инновационного индекса. Основной причиной сложившейся ситуации является низкая эффективность институтов, которые формируют условия для предпринимательской и творческой деятельности [2].

Медленное развитие инновационного потенциала России связано с низким уровнем коммерциализации научных разработок [3]. Хотя Россия занимает 30 место по уровню человеческого капитала и науки и имеет достойную научную и техническую базу, которая может быть использована для реализации инновационных разработок [2,4].

Складывается ситуация наличия инновационного и научного потенциала, но отсутствие его продвижения и как следствие патентования разработок. Тормозит процесс коммерциализации инновационных разработок отсутствие возможностей по их реализации и недостаточное количество специалистов, которые могут обеспечить работу самого процесса [4].

Активизировать научно-инновационную деятельность может взаимодействие государства, бизнеса и учёных при условии готовности и возможности к изменениям [5]. Благодаря этому будет возможна

коммерциализация, которая представляет собой совокупность работ по проведению исследований, результаты которых могут быть реализованы и предложены на рынках товаров и услуг для извлечения прибыли [4].

Целью данного исследования является анализ и представление Agile-подхода как инструмента, сопровождающего коммерциализацию научных разработок на разных уровнях.

Для решения поставленной цели были выделены следующие задачи:

– Проанализировать сопоставимость Agile-подхода и научно-исследовательской деятельности;
– Изучить сущность Agile-подхода;
– Составить схему процесса коммерциализации научных разработок с помощью Agile-подхода;
– Проанализировать возможности использования данного подхода на разных уровнях;
– Обосновать результаты исследования.

Образцы и методика эксперимента

До выбора формы коммерциализации разработчики сначала разрабатывают инновационный продукт. Далее осуществляют поиск специалистов по коммерциализации научных разработок и поиск перспективных рынков сбыта. Проводят маркетинговое исследование для выбора рынка и изучают потребителей соответствующего рынка. И только потом выбирают способ коммерциализации [4].

Существует несколько способов коммерциализации научных разработок [4]:

1. Коммерциализация с помощью лицензирования. После создания продукта разработчики передают лицензию на использование внешнему партнеру, за что и получают доход;
2. Коммерциализация через спин-офф (дочернюю) компанию. Продукт дорабатывается в дочерней компании и выводится на рынок через нее;
3. Объединение команды разработчиков и внешнего партнера, заинтересованного в новом продукте. Совместное создание и реализация на рынке;
4. Внешний партнер (компания) заказывает новый продукт у команды научных разработчиков;
5. Продажа интеллектуальной собственности. После создания продукта все права покупаются внешним партнером;
6. Создание новой организации совместно командой разработчиков и внешним партнером;

7. Формирование стратегических альянсов, то есть команда разработчиков – руководитель проекта, но внешний партнер входит в новую компанию и участвует процессе создания научного продукта.

Научный подход в реализации научных и инновационных разработок остается традиционным. Наличие старых методологий объясняется многолетним практическим опытом, но желание придерживаться традиционных подходов приводит к изучению узких научных областей и предоставлению ресурсов слабо определенным командам. Способность изменяться и использовать гибкие подходы в работе преобразует компании и обеспечивает устойчивое развитие [6].

В работе предлагается решить данную проблему с помощью Agile. Он (Agile) представляет собой гибкий подход или даже способ мышления в разработке и реализации нового продукта. Применяется преимущественно в IT-сфере, результаты которой характеризуются неопределенностью финансового результата и подверженностью изменениям внешней среды [7]. Идентичными характеристиками обладает научно-инновационная деятельность.

Работа Agile подхода заключена в разделении всего проекта на короткие шаги, что позволяет отслеживать промежуточные результаты, эффективно контролировать процесс разработки, максимально адаптироваться к внутренним и внешним изменениям. Весь процесс создания инновационного продукта представляет собой воронку с повторяющимися операциями: анализ, проектирование, создание, тестирование [8].

Процесс реализации научных разработок в научном подходе последователен. Отсутствует гибкость реакции и адаптации к быстро изменяющимся условиям, что сейчас является фактором провала многих проектов. Субъекты, обеспечивающие достижение гибкости проекта, – это менеджеры проектов, специалисты, которые сопровождают разработку нового продукта и его вывод на рынок [9].

Сводная информация проблем традиционной схемы разработки и коммерциализации научных разработок представлена в таблице 1 с решением с помощью Agile подхода.

Примером применения Agile в научной деятельности является биофармацевтическая компания PTC Therapeutics [6]. Для повышения эффективности работы и быстрого масштабирования она приняла Agile в командном управлении. Так руководители могут управлять большим объёмом работ и программ без потери их успешности и с повышением производительности.

Таблица 1 – Проблемы традиционной модели создания и коммерциализации научных разработок. Источники [2, 4, 6, 7, 10]

Проблема	Решение
Отсутствие способности традиционной модели адаптироваться	Гибкий подход проектного управления обеспечивает команду возможностью изменяться, улучшать внутренние коммуникации и включать заказчика в сам процесс разработки. Команда способна адаптироваться к постоянно изменяющейся среде
Высокая степень конкурентности среди научных институтов	Agile предполагает использование гибкого мышления, которое создает конкурентное преимущество, свободу для реализации нового продукта и быстрое удовлетворение потребностей клиентов
Нехватка специалистов, сопровождающих процесс разработки и продвижения инновационного продукта	Agile-подход может быть использован в процессе разработки научного и инновационного продукта. При этом он может быть внедрён как в отдельный элемент процесса разработки или как общее мышление

Результаты и обсуждение

Agile подход может улучшить процесс коммерциализации научных разработок по разным стратегиям (см. табл. 2).

Таблица 2 – Стратегия внедрения Agile в процесс коммерциализации научных разработок

Стратегия	Способ достижения	Уровень	Методы
1 – внедрение Agile подхода в сам процесс разработки, включая коммерциализацию	Чтобы достичь надо поддержать мировой тренд	Мировой	Наличие и поддержание agile – значит быть в тренде, потому что гибкие подходы более эффективны, чем жесткие или традиционные
2 – применение Agile подхода в отдельных элементах проекта	Чтобы достичь необходимо внедрять в научные институты	Российский	Agile-мышление в научных центрах и организациях
3 – сопровождение проекта специалистами Agile подхода	Чтобы достичь необходимо обучать студентов, как будущих специалистов	Предприятие/организация (пример, университет)	Обучение Agile и внедрение гибких принципов в работе над научными разработками (проектное обучение)

Коммерциализация и продвижение научных разработок будет намного эффективнее, потому что будет постоянное обновление, модернизация и

корректировка создаваемого продукта. В итоге создаваемый продукт не потеряет свою новизну и уникальность в период создания.

Одним из примеров опыта использования гибкого подхода является внедрение проектного обучения в Уральском Федеральном университете (УрФУ. Россия, город Екатеринбург). Нами рассмотрен непосредственный пример организации данного процесса на кафедре экономики и управления строительством и рынком недвижимости. Первый опыт проектного обучения в Институте экономики и управления УрФУ был осуществлен магистрантами кафедры «Экономики и организации строительства и рынка недвижимости» (ЭУС и РН) образовательной программы «Управление развитием территорий и девелопмент недвижимости« под руководством зав. кафедрой ЭУС и РН Ларионовой В.А. [11]. Заказчиками стали крупные производственные компании – это Корпорация МАЯК и ООО «Маркет Молл». Они полностью удовлетворены работой студентов. Практикующие эксперты отметили оригинальность проработанных концепций студенческих проектов и представленные обоснованные экономические расчеты, а также предложили новые интересные проекты для дальнейшей работы и перспективного сотрудничества. Первый опыт проектного обучения оказался удачным.

Кроме того, кафедра приняла непосредственное участие в решении реальных задач от работодателей, организовав конкурс научно-исследовательских баттлов «Реновация городских территорий» [12].

Например, корпорация «Маяк» поставила перед студентами цель – разработать концепцию девелоперского проекта адаптации объекта культурного наследия для современного использования.

Проблема заключалась в реновации усадьбы Нурова, находящейся по адресу: г. Екатеринбург, ул. Чапаева, дом 1. Так как сохранение и приспособление исторического объекта культурного наследия в центре Екатеринбурга имеет важный смысл для идентичности выражения архитектуры в городском развитии и при этом способствует преображению существующей территории для жителей и гостей города. Переосмысление концепции поможет усовершенствованию существующего общественного пространства и, как следствие, привлечет внимание граждан к объектам культурного наследия.

В решении той поставленной задачи приняло участие 18 команд студентов различных направлений и специальностей. Всего было вовлечено 92 студента работали под руководством 7 преподавателей-кураторов заявленных проектов. Студенты решали данную проблему, предлагая различные инновационные идеи в своих проектах. Основным направлением развития стали креативные индустрии: создание креативного пространства, арт-галереи, театр и другое. Каждая идея

была обоснована с точки зрения экономики, экологии, спроса и управления. Все они были приняты к рассмотрению и изучению возможностей внедрения заказчиком. Лучшие работы с инновационными подходами к концепциям использования были представлены на различных конференциях в городах Екатеринбурге, Иркутске, Петербурге.

Сохранение объектов культурного наследия стало одной из тем для обсуждения на главная промышленный выставке России «Иннопром-2021» [13]. Студенты уральских вузов защитили перед экспертами и представителями власти свое виденье на то, как и для чего можно реконструировать несколько исторических объектов на территории Свердловской области (в том числе это были лучшие концепции девелоперских проектов реновации, выполненные в рамках учебного процесса на кафедре ЭУС и РН УрФУ студентами строительного института). Для того, чтобы существующее здание воспринималось людьми как урбанизированной территории, оно должно быть вовлечено в городскую жизнь. Наделение города способностью мыслить есть то, что отличает город прошлого века от города современного века [14]. Так как кроме транспортного, зеленого и других основ, у него возникает еще и цифровая составляющая.

Главной идеей любых проектов есть мысль о том, что территория креативных людей – это урбанизированная территория, где хочется жить! Исходя из этой идеи, по ходу планирования, организации и управления проектного обучения надо ставить для участников задачу, чтобы сгенерировать варианты и предложения для повышения привлекательности того места, где мы обитаем, живем, трудимся работаем и отдыхаем. В спектр обсуждаемых вопросов вошли следующие:

- Как сделать урбанизированную территорию привлекательной для работы?
- Как сделать урбанизированную территорию привлекательной для жизни?
- Как сделать урбанизированную территорию привлекательной для учебы?
- Как сделать урбанизированную территорию привлекательной для посещения и туризма?
- Как сделать урбанизированную территорию социально привлекательной?

Для решения всех затрагиваемых вопросов к диалогу нужно приглашать Представителей органов власти и институтов развития, Общественных представителей Агентства Стратегических Инициатив по Свердловской области, бизнесменов и предпринимателей, а также студентов и выпускники вузов. Участники обязательно найдут интересные аспекты для обсуждения между собой и обсудят привлекательность урбанизированных территорий для жизни, вопросы

комфорта городской среды, предпринимательства, туризма и образования, а также возможности творческой самореализации.

Таким образом симбиоз совместных усилий студентов, предприятий и государства является эффективным способом взаимодействия в работе. Команды проектов включаются в решение прикладных задач от заказчика. В процессе разработки они, как правило, могут быстро адаптироваться к внешним условиям. При этом преобладает гибкое мышление и присутствует свобода в реализации продукта. Студенты принимают участие в решении реальных задач, интересующих бизнес. Их креативные подходы в предложенных инновационных концепциях могут быть коммерциализированы в дальнейшем. Если студент хорошо занимается и активно участвует в проектной деятельности при работе над проектом (т. е. чем-то отличается), то, как правило, работодатель приглашает его на практику. Там он получает не то, чтобы гарантированное трудоустройство, а хотя бы практические навыки работы. Благодаря чему перспективный студент видит то, что он сможет работать в той или иной организации по определенному направлению.

Полученный опыт показал, что приоритет в индивидуальной траектории обучения будет на особом внимании к получаемому набору компетенций студентов на выходе обучения, как наиболее востребованному навыку у работодателей на практике [15]. В проектном обучении идет работа студентов в малых группах от 3 до 8 человек над решение практической задачи от работодателя под руководством опытного преподавателя куратора. Студенты наиболее полно раскрываются в такой модели обучения на основе Agile-подхода, демонстрируя креативность мышления в сочетании с приобретаемыми компетентностными навыками и умениями.

Заключение

Сложившаяся традиционная модель создания и продвижения научной разработки не отвечает мировых вызовам. Отсутствие возможностей по реализации научных разработок и специалистов, сопровождающих этот процесс, затрудняет процесс коммерциализации. Для решения проблемы предлагается подход Agile. Он может быть адаптирован под любой способ коммерциализации.

Сейчас достаточно сложно иметь конкурентное преимущество в динамичной среде, наполняемой инновационными разработками. Agile-подход решает эту проблему с помощью гибкого мышления. В научной сфере использование подобных методов противоречиво, но очень эффективно и перспективно. Адаптация выходит на первый план даже в науке.

Библиографический список

1. Вархолова В. А. Проблемы коммерциализации университетских инноваций в России / В. А. Вархолова // Наука, образование, инновации: пути развития. – 2019. – № 10. – С. – 150–154.
2. Гохберг Л. М. Глобальный инновационный индекс-2020 / Л. М. Гохберг, М. А. Гершман, В. А. Рудь, Е. А. Стрельцова // Институт статистических исследований и экономики знаний. – URL: https://issek.hse.ru/news/396120793.html (дата обращения: 13.01.2021).
3. Низкий уровень коммерциализации научных разработок препятствует развитию инноваций в Российской Федерации // Рамблер. – URL: https://news.rambler.ru/other/40340511-nizkiy-uroven-kommertsializatsii-nauchnyh-razrabotok-tormozit-razvitie-innovatsiy-v-rf/. – Дата публикации: 18 июля 2018.
4. Карпычева С. А. Разработка алгоритма процесса коммерциализации разработок в научных организациях / С. А. Карпычева // Вестник Московского университета. – 2017. – № 5. – С. 125–144.
5. Нугуманова Г. Р. Методологические подходы к использованию коммерциализации в инновационной системе России / Г. Р. Нугуманова // Креативная экономика. – 2019. – Т. 13, № 3. – С. 449–458.
6. Фиоре А. Почему наукоемкие компании должны использовать Agile / А. Фиоре, К. Уэст, А. Сегналини // Harvard Business Review. – URL: https://hbr.org/2019/11/why-science-driven-companies-should-use-agile (дата обращения: 13.01.2021).
7. Локтионов Д. А. Критерии применения гибкой методологии для управления проектами / Д. А. Локтионов, В. П. Масловский // Креативная экономика. – 2018. – Т. 12, № 6. – С. 839–854.
8. Тесинга Т. Гибкое управление проектами по сравнению с водопадным. Модель принятия решений для выбора подходящего подхода к проекту / Т. Тесинга, К. Фельдманна, М. Бурчардтб // Процедура информатики. – 2021. – Т. 181. – С. 746–756.
9. Lill P. The agility-control-nexus: A levers of control approach on the consequences of agility in innovation projects / P. Lill, A. Wald. – DOI 10.1016/J.TECHNOVATION.2021.102276 // Technovation. – 2021. – Vol. 107. – P. 102276.
10. Borba J. C. Agile Management in Product Development / J. C. Borba, L. G. Trabasso, M. V. Pessoa. – DOI 10.1080/08956308.2019.1638488 // Research-Technology Management. – 2019. – Vol. 62, Iss. 5. – P. 63–67.
11. Проектное обучение в действии : УрФУ. – URL: https://gsem.urfu.ru/ru/news/37095/ (дата обращения: 13.01.2021).
12. Весенние дни науки : УрФУ. – URL: https://gsem.urfu.ru/ru/science/konferencii/vesennie-dni-nauki/2021/ (дата обращения: 13.01.2021).

13. «Спасибо, что не музей». Власть, бизнес, студенты – о работе с историческим наследием // Деловой квартал. – URL: https://ekb.dk.ru/news/237153713. – Дата публикации: 16 июля 2021.
14. «Цифра» наделяет общим языком людей и прежде немые городские объекты» // Ecnjqxbdst ujhjlf – 2021. – URL: https://plus-one.ru/society/tsifrovye-goroda?fbclid=IwAR2v6E-bxhqUrEYpUNISzQIyQYicKcgS6f5SVX5qa9wCYm-8S9O4tQGbEutA. – Дата публикации: 9 июля 2021.
15. Куда приведут вузы индивидуальные образовательные траектории // Форпост Северо-Запад. – URL: https://forpost-sz.ru/a/2021-07-15/kuda-privedut-vuzy-individualnye-obrazovatelnye-traektorii?. – Дата публикации: 15 июля 2021.

УДК 535.376

Туйков А.С., Сюрдо А.И., Абашев Р.М., Краснопёров В.С., Мильман И.И.

СПЕКТРАЛЬНОЕ И ВРЕМЕННОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ СИГНАЛОВ ОПТИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ И ОПТИЧЕСКИ СТИМУЛИРОВАННОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В АНИОНОДЕФЕКТНОМ КОРУНДЕ

Аннотация. В статье описаны проблемы спектрального и временного разделения сигналов стимуляции и оптически стимулированной люминесценции в анионодефицитном корунде для определения индивидуальных эквивалентов доз при индивидуальном дозиметрическом контроле.

Ключевые слова: Оптически стимулированная люминесценция, анионодефицитный корунд, Al_2O_3, спектральное разделение.

Abstract. The paper describes the problems of spectral separation of signals of stimulation and optically stimulated luminescence of anion-deficient corundum in order to determine the individual dose equivalents under dosimetric control.

Keywords: Optically stimulated luminescence, anion-deficient corundum, Al_2O_3, spectral separation.

Введение

В настоящее время на большинстве крупных российских объектов атомной отрасли, включая атомные электростанции, для индивидуального дозиметрического контроля (ИДК) используются преимущественно автоматические термолюминесцентные (ТЛ) системы зарубежного производства [1]. Необходимо отметить, что не все метрологические характеристики ТЛ-систем в полной мере соответствуют современным нормам радиационной безопасности [2], а также, в силу самой технологии ТЛ, не могут обеспечить необходимой производительности считывания дозиметрической информации. При ТЛ-считывании также является ограниченным ресурс использования дозиметров, в том числе из-за термической и радиационной деградации упаковывающих детекторы пленок. Активно развивающаяся технология оптически стимулированной люминесценции (ОСЛ) лишена и еще ряда недостатков ТЛ, указанных ниже:

- сложность воспроизведения законов изменения температуры;
- термическое тушение люминесценции;
- тепловое излучение нагревателя;
- нелинейность выхода ТЛ в зависимости от дозы предварительного облучения;

– использование для нагревания детекторов очищенного подогреваемого до 350°С азота.

В дополнение, технология ОСЛ позволяет проводить неоднократные измерения дозы облучения, с учетом поправки на высвечиваемость в каждом проведенном считывании. В ОСЛ-считывателях используется доступная и легко заменяемая элементная база, так, например, в качестве источников стимулирующего излучения чаще всего используются светодиоды.

Технология ОСЛ-считывания основана на оптическом селективном высвобождении носителей заряда с ловушек, заполненных при облучении ионизирующей радиацией, и регистрации ОСЛ-сигнала, возникающего в результате рекомбинации освобожденных носителей на центрах люминесценции. Выход ОСЛ оказывается пропорциональным поглощенной дозе ионизирующего излучения и интенсивности стимулирующего света. Стадии использования технологии ОСЛ включают возбуждение детектора ионизирующим излучением, приводящее к образованию электронно-дырочных пар, период хранения, сопровождающийся метастабильной концентрацией электронов и дырок, захваченных на дефектах кристалла, оптическую стимуляцию, приводящую к рекомбинации электронно-дырочных пар, сопровождающуюся эмиссией света. [5]

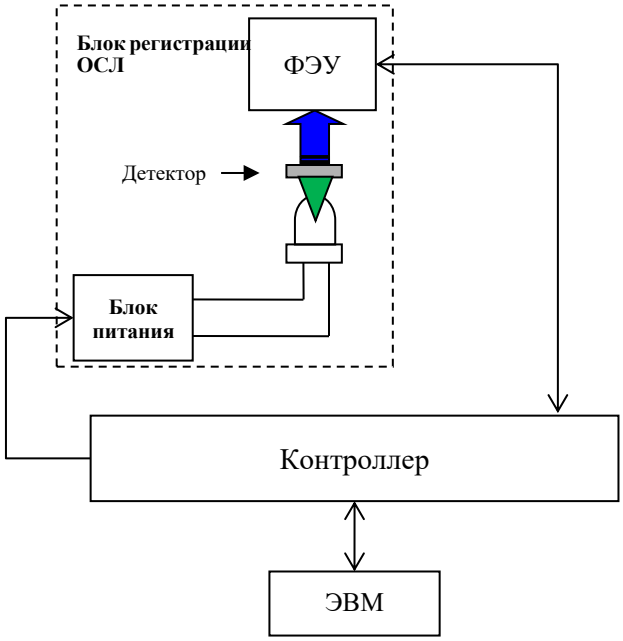
Независимо от выбранного режима оптической стимуляции детекторов – непрерывного или импульсного, необходимо применение дополнительного спектрального разделения стимулирующего и ОСЛ-сигналов. Это связано с тем, что в подавляющем большинстве приборов для индивидуальной дозиметрии в качестве фотодетекторов применяются фотоэлектронные умножители (ФЭУ), которые имеют высокую чувствительность в спектральной области, где у большинства ОСЛ-материалов, включая анионодефицитный корунд или α-$Al_2O_{3-\delta}$, производится оптическая стимуляция и происходит излучение активных в ОСЛ-процессе F-центров (анионная вакансия с двумя электронами). Современные модели ФЭУ могут быть размещены в одном корпусе с источником высокого напряжения, формирователем выходных сигналов и схемой защиты и иметь питание от пониженного напряжения +5В [4].

Недостаточное спектральное разделение сигналов ОСЛ и стимуляции сильно ухудшает соотношение сигнал/шум, а в случае чрезмерно интенсивной стимуляции может приводить к срабатыванию схемы защиты ФЭУ и регистрация полностью прекращается на относительно продолжительное время. Поэтому одной из важных проблем в индивидуальной ОСЛ-дозиметрии ионизирующих излучений является разделение сигналов оптической стимуляции и люминесценции. Для ОСЛ-детекторов на основе α-$Al_2O_{3-\delta}$ разделение указанных сигналов также представляет собой сложную задачу. Целью работы является поиск оптимальных вариантов

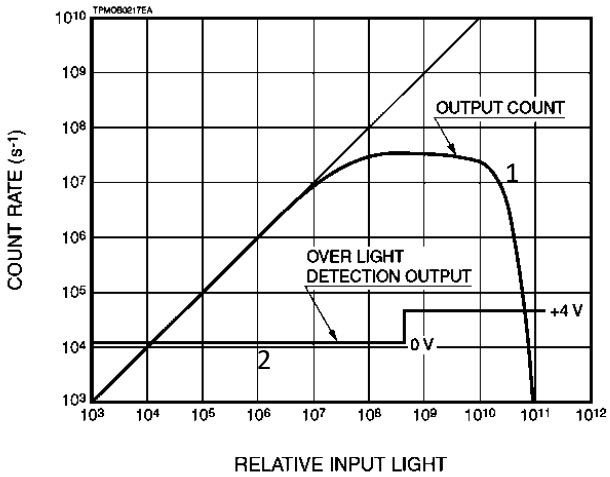
построения системы оптической стимуляции и регистрации ОСЛ для детекторов на основеα-$Al_2O_{3-\delta}$, планируемых к применению в разрабатываемой дозиметрической ОСЛ-системе.

Аппаратура и методика эксперимента

На Рисунке 1 изображена упрощенная блок-схема разрабатываемого ОСЛ-считывателя (а) и счетная характеристика примененного в нем модуля ФЭУ серии H10682 фирмы Hamamatsu (b, кривая 1). Отдельно на рисунке 1b (кривая 2) показано, как при входной световой загрузке ~10^8 относительных единиц формируется сигнал перегрузки, отключающий процесс генерации высокого напряжения.



а)



б)

Рисунок 1 – а) Упрощенная блок-схема ОСЛ измерительной системы; б) линейность счета импульсов ФЭУ сери H10682 (Hamamatsu) и возникновение сигнала перегрузки [4].

Близкое расположение и даже незначительное перекрытие полосы люминесценции активных в ОСЛ процессе F-центров в α-$Al_2O_{3-\delta}$, имеющей при T=300 К максимум $h\nu_{em}$=3.0 эВ и полуширину H_{em}=0.7 эВ, и полосы опустошения дозиметрической ловушки с $h\nu_{trap}$=2.6 эВ и H_{trap}=0.7 эВ сильно усложняют решение задачи спектрального разделения [2]. Для наглядности на Рисунке 2 приведены спектры свечения F-центров (кривая 1), используемого источника стимулирующего излучения (кривая 2), представляющего собой сборку из мощных светодиодов серии XQ-E, CREE Inc. с $h\nu_{stim}$=2.3 эВ и H_{stim}=0.14 эВ и спектральная чувствительность примененного в работе ФЭУ (кривая 3). Как видно, спектры сигнала стимуляции и полезного сигнала имеют незначительное перекрытие в области 2.2-2.6 эВ.

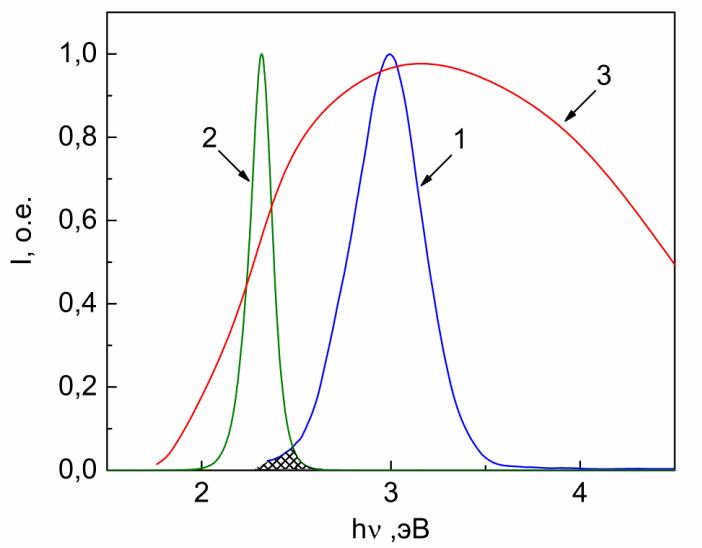


Рисунок 2 – Спектры свечения F-центров (1), стимулирующего излучения (2) и спектральная чувствительность ФЭУ (3)

Результаты и обсуждение

Достичь наилучших результатов спектрального разделения указанных сигналов удается, применяя набор абсорбционных светофильтров из цветного стекла ЖС-18 и СС-15, а также их специальное расположение, как показано на рис. 3а. Полные спектральные характеристики фильтров ЖС-18 и СС-15 приведены в [5]. Такой набор светофильтров позволяет сузить с низкоэнергетической стороны спектральную область пропускания в канале регистрации ОСЛ-сигнала и подавить высокоэнергетическую «хвостовую» часть полосы излучения светодиодного источника оптической стимуляции.

На рисунке 3б приведены спектры пропускания светофильтра ЖС-18 толщиной 4 мм (кривая 1), сборки из 4 фильтров СС-15 общей толщиной 12 мм

(кривая 2). На нем также представлены спектры излучения источника-стимулятора с максимальной исходной светосуммой S_{max}=0.216 о.е. до (кривая 3) и после прохождения фильтра ЖС-18 (кривая 4), а также после прохождения дополнительно детектора и сборки фильтров СС-15 с $S_{max_прош}=7.14\cdot10^{-8}$ о.е. (кривая 5). Из рисунка 3б также видно (кривая 6), что использование сборки фильтров СС-15 в канале регистрации ОСЛ не только ослабляет полезный ОСЛ-сигнал, формируемый, в основном, свечением F-центров, но и одновременно существенно снижает перекрытие его спектра со спектром излучения источника-стимулятора. Как итог, система светофильтров пропускает ~40% полезного ОСЛ-сигнала и ослабленного в $S_{max}/S_{max_прош} \approx 3\cdot10^{8}$ раз сигнала оптической стимуляции.

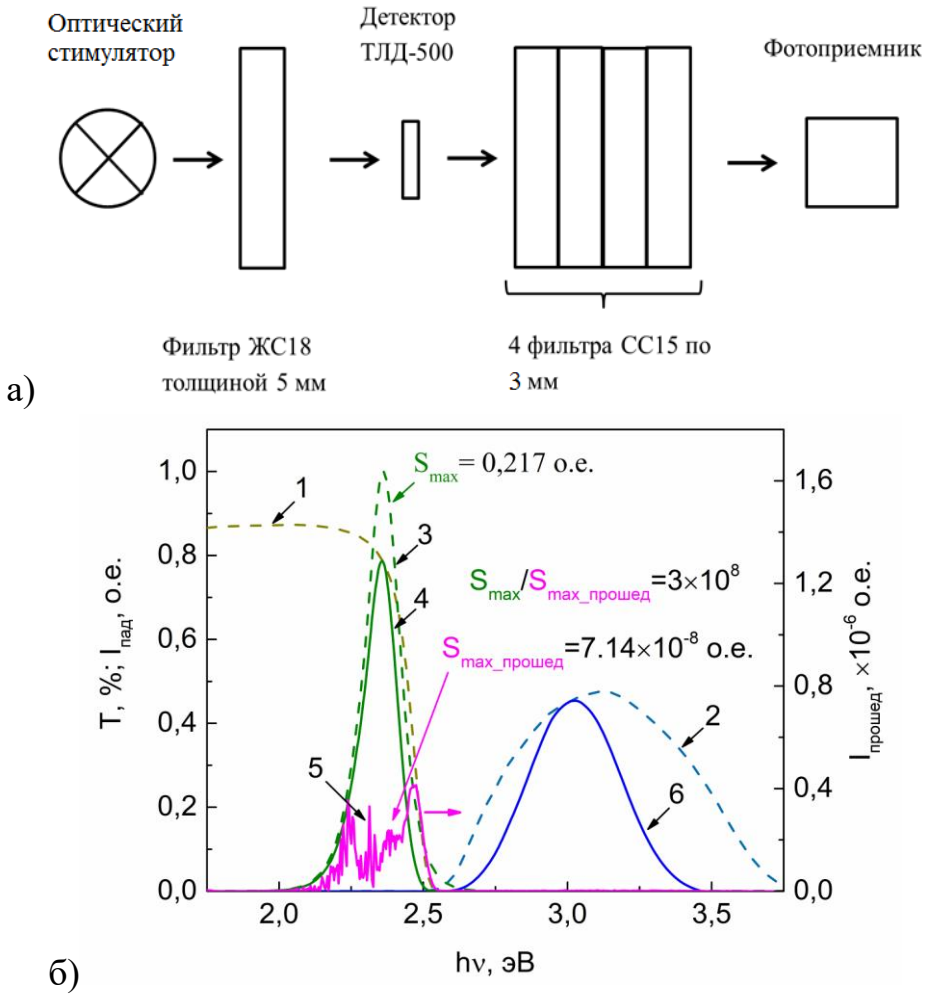


Рисунок 3 – Спектральное разделение сигналов оптической стимуляции и ОСЛ: а) расположение светофильтров; б) спектры пропускания фильтров ЖС-18 (1) и СС-15 (2), свечения оптического стимулятора до (3) и после (4) прохождения через фильтры, итоговое подавление сигнала стимулятора на входе ФЭУ (5), свечение F-центров после фильтров СС-15 (6)

Однако даже такое существенное подавление стимулирующего излучения может оказаться недостаточным. Известно, что выход ОСЛ прямо пропорционален интенсивности стимуляции. Следовательно, для увеличения чувствительности всей ОСЛ-системы, в целом, необходимо стремиться максимально повысить оптическую мощность источника-стимулятора. Поэтому при измерении малых доз облучения недостаточно использовать только спектральное разделение ОСЛ и стимулирующего сигналов, а необходимы еще какие-то способы увеличения соотношения сигнал/шум. Одним из таких способов для их разделения является, например, применение время-разрешенного режима, когда оптическая стимуляция и регистрация ОСЛ-сигнала производится в отдельных временных окнах. Такой режим реализуем, если такую возможность может предоставить материал детекторов, а именно спектрально-оптические и люминесцентно-кинетические характеристики активных центров.

Известно [1], что время жизни F-центра в возбужденном состоянии составляет 36 мс. Указанный факт позволяет применить импульсный метод стимуляции и регистрировать ОСЛ в интервалах времени, когда стимуляция отключена.

В разрабатываемой дозиметрической ОСЛ-системе выбор частоты, скважности и интенсивности сигнала стимуляции произведен с учетом следующих факторов: диапазон измеряемых эквивалентных доз, подобранной комбинации светофильтров, источника стимулирующего света, его спектральной характеристики и переходных процессов, материала детектора и характеристик ФЭУ. При определенной комбинации выше перечисленных характеристик и параметров стимуляции удается снизить соотношение сигнал/шум и получить максимальную светосумму сигнала ОСЛ, а, следовательно, и максимальную чувствительность, при минимальной потере информации на детекторе за одно считывание.

Заключение

В результате специального подбора фильтров и их расположения в блоках стимуляции и регистрации, а также временного разделения стимулирующего и ОСЛ сигналов удалось повысить соотношение сигнал/шум в установке до уровня, позволяющего уверенно измерять эквиваленты доз ~5-10 мкЗв.

Библиографический список

1. Akselrod M. S. A radiation dosimetry method using pulsed optically stimulated luminescence / M. S. Akselrod, S. W. S. McKeever. – DOI 10.1093/OXFORDJOURNALS.RPD.A032583 // Radiation Protection Dosimetry. – 1999. – Vol. 81, Iss. 3 – P. 169.

2. Власов М. И. Фототрансферные эффекты в люминесцентных детекторах ТЛД-500 и их связь с выходами термически и оптически стимулированной люминесценции / М. И. Власов, А. И. Сюрдо, И. И. Мильман, Р. М. Абашев // Известия РАН. Серия физическая. – 2014. – Т. 78, № 9. – С. 1198–1200.
3. Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009» : утв. постановлениемГл. гос. санитарного врача Рос. Федерации от 7 июля 2009 г. № 47 // Гарант. – URL: https://base.garant.ru/4188851/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/ (дата обращения: 12.07.2021).
4. Hamamatsu photon counting head H10682 SERIES // Hamamatsu Photonics K.K. – 2010. – URL: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/-H10682_TPMO1075E.pdf (дата обращения: 01.07.2021).
5. Каталог цветного стекла – Москва : Машиностроение, 1967. – 62 с.
6. Yukihara E. G. McKeever Optically Stimulated Luminescence. Fundamentals and Applications / E. G. Yukihara, S. W. S. McKeever // Physics Department, Oklahoma State University. – Oklahoma : John Wiley & Sons Ltd, 2011. – P. 48, 53.

УДК 544.6-143

Вараксин А.В., Петрова С.А., Ремпель А.А.

СИНТЕЗ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО КАРБИДА ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ В СОЛЕВОМ РАСПЛАВЕ

Аннотация. В данной работе рассмотрена возможность синтеза высокоэнтропийного карбида $(Hf_{0,2}Nb_{0,2}Ta_{0,2}Ti_{0,2}Zr_{0,2})C$ в солевом расплаве. Метод основан на явлении переноса одного металла на карбид другого металла через расплавленную соль без протекания через неё электрического тока.

Ключевые слова: высокоэнтропийный карбид, солевой расплав.

Abstract. This paper describes a method of synthesizing a high entropy carbide in a molten salt. The method is based on the phenomenon of electric current less transfer of one metal to another metal through a molten salt.

Keywords: high entropy carbide, molten salt.

Введение

В настоящее время высокоэнтропийные карбиды переходных металлов вызывают большой интерес у исследователей. Индивидуальные карбиды этих металлов обладают высокой твёрдостью, износостойкостью, температурой плавления. Первые исследования таких многокомпонентных систем показали, что эти соединения обладают более высокой твёрдостью, износостойкостью и стойкостью к окислению по сравнению с индивидуальными карбидами [1,2].

Классическими методами получения высокоэнтропийных карбидов являются: механоактивация металлических порошков и графита в качестве исходных компонентов, механоактивация карбидов соответствующих металлов, карботермическое восстановление оксидов металлов. Прекурсоры, полученные по этим классическим методикам, на заключительной стадии подвергаются плазменно-искровому спеканию [3]. В настоящей работе предпринята попытка синтеза высокоэнропийного карбида состава $(Hf_{0,2}Nb_{0,2}Ta_{0,2}Ti_{0,2}Zr_{0,2})C$ в расплаве солей с последующей плавкой в электродуговой печи. К преимуществам предлогаемого метода можно отнести использование сравнительно невысокой температуры и доступность оборудования.

Образцы и методика эксперимента

Для покрытия металла другим металлом было использовано явление бестокового переноса. Суть этого процесса заключается в следующем. Если разнородные металлы поместить в расплавленный электролит, содержащий ионы

более электроотрицательного металла, то более электроотрицательный металл будет являться анодом гальванопары, более электроположительный металл катодом [4]. Схема подобного гальванического элемента приведена ниже. *Me(1)* более электроотрицательный, чем Me(2) и будет переноситься на *Me(2)*

$$(-)Me(1)|\ \text{электролит}\ |\ Me(2)(+)$$

Ионы восстановленной формы от поверхности металла *Me(1)*, где их концентрация выше, диффундируют к поверхности металла *Me(2)*, где их концентрация ниже, и тем самым нарушают равновесное соотношение иоинов $[Me']^{n+}/[Me']^{b+}$ вблизи поверхности *Me(2)*. Чтобы восстановить равновесие, должна произойти реакция, в результате которой концентрация ионов $[Me']^{n+}$ уменьшится. Этой реакцией является реакция диспропорционирования с образованием поверхностного сплава *Me(1)Me(2)*. Ионы более высокой степени окисления диффундируют к *Me(1)* и нарушают равновесное соотношение $[Me]^{n+}/[Me]^{b+}$ вблизи его поверхности, создавая избыток ионов $[Me]^{b+}$. Система реагирует на действие такого потока j_{ox} растворением металла *Me(1)* с образованием ионов восстановленной формы. После этой реакции эти ионы снова начинают своё движение к сплаву *Me(1)Me(2)*. Таким образом, процесс замыкается в цикл, схема которого показана ниже [4илющ]

$$Me(1)\begin{bmatrix} [Me]^{n+} & \xrightarrow{j_{red}} & [Me']^{n+} \\ \uparrow & & \downarrow \\ [Me]^{b+} & \xleftarrow{j_{ox}} & [Me']^{b+} \end{bmatrix} Me(1)Me(2)|Me(2)$$

В случае синтеза высокоэнтропийного карбида состава $(Hf_{0,2}Nb_{0,2}Ta_{0,2}Ti_{0,2}Zr_{0,2})C$ первым необходимо синтезировать карбид ниобия, так как ниобий является самым электроположительным металлом, входящим в многокомпонентный карбид [5бараб, 6смирн]. При этом схема гальванического элемента будет иметь вид

$$(-)Nb|\ \text{электролит}\ |\ C(+)$$

Состав электролита для синтеза карбида ниобия был выбран следующий: KCl-5% KF-5% K_2NbF_7. Температура процесса 750°C. Процессы, происходящие на электродах гальванопары с некоторым упрощением для валентностей образующихся ионов ниобия, выглядят следующим образом:

$$\text{Анод: } Nb + 4\,Nb^{5+} = 5\,Nb^{4+}$$

$$\text{Катод: } C + 5\,Nb^{4+} = NbC + 4\,Nb^{5+}$$

Рентгенограмма получившегося образца представлена на рисунке 1.

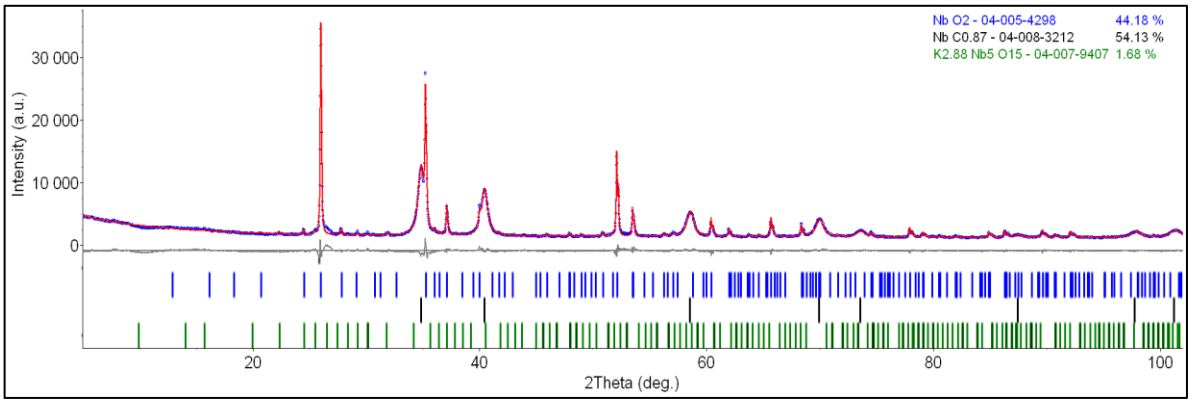


Рисунок 1 – Рентгенограмма образца карбида ниобия

Из-за недостаточного контроля за составом газовой атмосферы над солевым расплавом часть металлического ниобия окислилась. В дальнейшем этот факт будет оказывать влияние на состав получившихся покрытий.

Следующим шагом было поэтапное покрытие карбида ниобия металлами, составляющими высокоэнтропийный карбид. Первым металлом покрытия был тантал. Для этого случая гальванопара в солевом расплаве имеет вид

$$(-)Ta|\ \text{электролит}\ |\ NbC(+)$$

Состав электролита для переноса тантала на карбид ниобия: KCl – 5% KF – 5% K_2TaF_7, температура процесса 750°C. После проведения процесса методом РФА были идентифицированы следующие фазы: $Ta_{1.19}O_{1.5}$; $K_{3.2}Ta_{4.05}Nb_{14.1}O_{47}$; $K_3Nb_{5.4}O_{15}$. Наличие низшего оксида тантала и продуктов реакции электролита с оксидами ниобия и тантала говорит о том, что присутствие оксида ниобия наряду с карбидом после первого эксперимента помешало образованию покрытия из тантала с дальнейшим переходом в карбидную фазу.

Полученный продукт затем покрывали металлами группы IVB в соответствии с их положением в электрохимическом ряду: Ti → Zr → Hf. Механизм получения покрытия идентичен описанному выше; для осуществления процесса бестокового переноса использовались соответствующие соли металлов состава K_2MeF_6 (Me = Ti, Zr, Hf). Основные фазы, определенные методом РФА после каждого этапа, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные фазы после послойного покрытия металлами IVB группы карбида ниобия, покрытого танталом

Металл покрытия	Основные фазы
Ti	TiO, Ti2$O_{2.98}$, $TiO_{0.325}$ Nb_6C_5 , Nb_2C $TiC_{0.91}$
Zr	ZrO_2 $TiC_{0.71}O_{0.28}$ Ti_2O
Hf	ZrO_2 $Hf_{0.17}Nb_{0.83}$ $TiC_{0.57}O_{0.43}$, $TiC_{0.65}$, TiO

После проведения процесса покрытия образца металлическим гафнием полученный продукт переплавлялся в дуговой печи в атмосфере аргона на графитовом поде. Рентгенофазовый анализ показал наличие следующих фаз: ZrO_2; $TiC_{0.57}O_{0.43}$; $Ti_{0.8}O$; $Hf_{0.17}Nb_{0.83}$; $TiC_{0.65}$; TiO; $(Zr_{0.25}Hf_{0.75})C$; HfO_2; $ZrC_{0.02}$.

Заключение

Несмотря на наличие множества фаз в конечном образце после плавления, можно отметить, что процесс переноса металлов на карбид в расплавах солей может быть осуществлён. Это подтверждается результатами рентгенофазового анализа – после последовательного осаждения металлов на образец открывается новое соединение металла предыдущим покрытием. Однако переходные металлы окисляются при температурах процесса даже когда они находятся в расплавленной соли. Этот эффект негативно сказывается на составе получаемых покрытий и поэтому требуется тщательный контроль состава газовой атмосферы над расплавом во время проведения эксперимента.

Благодарности

Работа выполнена в рамках госзадания ИМЕТ УрО РАН. Исследования проводились с использованием оборудования центра коллективного пользования Урал – М.

Библиографический список

1. High-entropy high-hardness metal carbides discovered by entropy descriptors / P. Sarker, T. Harrington, C. Toher [et al.]. – DOI 10.1038/s41467-018-07160-7 // Nature Communications. – 2018. – Vol. 9. – P. 4980.
2. High entropy carbide ceramics from different starting materials / X. F. Wei, Ji-Xuan Liu, Fei Li [et al.]. – DOI 10.1016/J.JEURCERAMSOC.2019.04.006 // Journal of the European Ceramic Society. – 2019. – Vol. 39, Iss. 10. – P. 2989–2994.
3. Feng L. High-Entropy Ultra-High-Temperature Borides and Carbides: A New Class of Materials for Extreme Environments / L. Feng, W. Fahrenholtz, D. Brenner. – DOI 10.1146/ANNUREV-MATSCI-080819-121217 // Annual Review of Materials Research. – 2021. – Vol. 51, Iss. 1. – P.
4. Илющенко Н. Г. Взаимодействие металлов в ионных расплавах / Н. Г. Илющенко, А. И. Анфиногенов, Н. И. Шуров. – Москва : Наука, 1991. – 175 с. – ISBN 5-02-001470-2.
5. Барабошкин А. Н. Электрокристаллизация металлов из расплавленных солей / А. Н. Барабошкин. – Москва : Наука, 1976. – 280 с.
6. Смирнов М. В. Электродные потенциалы в расплавленных хлоридах / М. В. Смирнов. – Москва : Наука, 1973. – 247 с.

УДК 621.039

Кинева Д.А., Долгий Ю.Ф., Сесекин А.Н., Ташлыков О.Л.

ОПТИМАЛЬНЫЙ ПО ВРЕМЕНИ АЛГОРИТМ НАВЕДЕНИЯ МЕХАНИЗМА ПЕРЕГРУЗКИ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА В РЕАКТОРАХ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

Аннотация. Предложен алгоритм оптимального по быстродействию механизма перегрузки ядерного топлива реактора на быстрых нейтронах БН-800. Применение такого алгоритма управления приведет к сокращению времени остановки реактора на перегрузку ядерного топлива.

Ключевые слова: оптимальное управление, механизм перегрузки, реактор БН-800.

Abstract. An algorithm for the speed-optimal mechanism for reloading the nuclear fuel of the BN-800 fast neutron reactor is proposed. The use of such a control algorithm will lead to a reduction in the shutdown time of the reactor for the refueling of nuclear fuel.

Keywords: optimal control, refueling mechanism, BN-800 reactor.

Введение

Периодически в связи с выгоранием топлива в ядерных реакторах на АЭС осуществляется перегрузка ядерного топлива. В связи с тем, что на время перегрузки реактор останавливается (за исключением реакторов типа РБМК-1000 [1]), это ведет к недовыработке электроэнергии на АЭС. Поэтому необходимо сокращать время на перегрузки топлива. Задача минимизации суммарного времени перегрузки состоит в определении очередности перемещения тепловыделяющих сборок (ТВС). В качестве вспомогательной задачи возникает задача о минимизации времени перемещения захвата механизма перегрузки ТВС из одного заданного положения в другое. Используя результат последней задачи, мы можем определить для заданной очередности перемещений ТВС суммарное время на перегрузку ядерного топлива (оптимизируемый функционал) [2]. Это, в свою очередь, позволит решить маршрутную задачу оптимизации суммарного времени перегрузки ТВС.

Корпус реакторов на быстрых нейтронах представляет собой цилиндр, изготовленный из специальных нержавеющих сталей перлитного и аустенитного классов. Теплоотвод обеспечивается благодаря высокоэффективному теплоносителю – жидкому натрию. На горловине корпуса реактора установлен механизм перегрузки ядерного топлива. Чтобы выгрузить выгоревшую тепловыделяющую сборку из реактора, захват перегрузочной машины должен переместиться в точку с координатами, соответствующими местоположению ТВС. Затем захват опускается и зацепляет ТВС. После этого ТВС поднимается и

перемещается в заданное место В бассейн выдержки или на новое место). В обратном порядке происходит загрузка свежей ТВС. Время, затраченное на поднимание и опускание ТВС, зацепление и расцепление захвата можно не учитывать, так как оно в рассматриваемой задаче не минимизируется. Поэтому задачу можно рассматривать как плоскую задачу.

Особенность механизмов перегрузки ядерного топлива в реакторах на быстрых нейтронах БН-600 и БН-800 состоит в том, наведение механизма перегрузки на координаты топливной сборки, его перемещение в реакторе осуществляется в результате взаимного вращения двух (БН-600) или трех (БН-800) цилиндров, называемых поворотными пробками, расположенными эксцентрично [3]. Заметим, что, например, в реакторе ВВЭР-1000 операция перегрузки топлива осуществляется с помощью перегрузочной машины, представляющей собой напольный мостовой кран [1].

В работе построена математическая модель механизма перегрузки ядерного топлива, состоящего из трех вращающихся пробок, которая несколько отличается от математической модели, рассматриваемой в [4]. Предложенная модель реализована с помощью уравнений Лагранжа второго рода. Эта модель является существенно нелинейной и трудна для исследования. В связи с этим в работе [4] был рассмотрен вариант задачи, когда поворотные пробки вращаются последовательно. Для оптимизации поворота одной пробки использовался результат из [4]. Для одновременного разворота двух пробок использовался результат из [5]. В итоге задача была сведена к задаче нелинейного программирования с тремя переменными и геометрическими связями. В этой работе рассматривается случай, когда одновременно могут вращаться большая и средняя пробки. Построен оптимальный алгоритм управления. Заметим, что рассматриваемая задача является вспомогательной для задачи определения очередности перестановки ТВС, которая является маршрутной задачей [2] с нестандартными ограничениями.

Математическая модель системы трех пробок с эксцентриситетами

На рис. 1 приведена схема трех поворотных пробок реактора БН-800. Здесь точка O_1 (центр большой пробки) неподвижна. Система координат O_1xy неподвижна. O_2 – точка, неподвижная относительно первой пробки (центр второй пробки), $O_1x_1y_1$ – система координат, жёстко связанная с первой (большой) пробкой, φ_1 – угол поворота её относительно неподвижной системы координат, $O_2x_2y_2$ – система, жёстко связанная со второй (средней) пробкой, φ_2 – угол поворота её относительно подвижной системы $O_1x_1y_1$, O_3 – точка, неподвижная относительно второй пробки, $O_3x_3y_3$ – система координат, жёстко связанная с

третьей (малой) пробкой, φ_3 – угол поворота её относительно подвижной системы $O_2x_2y_2$ (см. рис. 1), C_2, C_3 – центры масс большой, средней и малой пробок. На пробки действуют управляющие моменты u_1, u_2 и u_3. Движение механизма описывается в горизонтальной плоскости. Виртуальная работа моментов, $\delta A = u_1\delta\varphi_1 + u_2\delta\varphi_2 + u_3\delta\varphi_3$то есть обобщённые силы $Q_1 = u_1, Q_2 = u_2, Q_3 = u_3$.

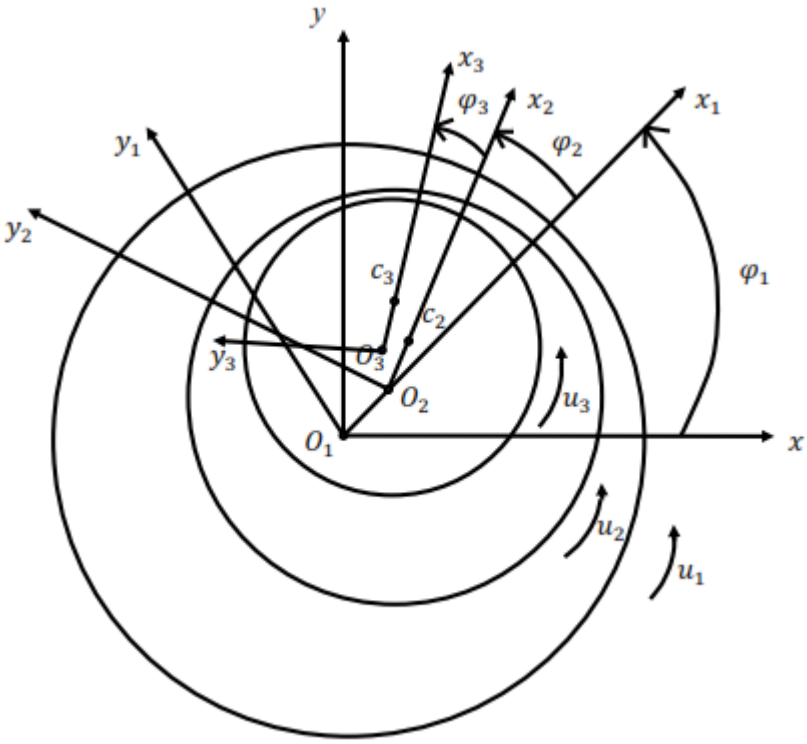


Рисунок 2 – Схема поворотных пробок

Кинетическая энергия механизма определяется суммой кинетических энергий трех пробок: $T = T_1 + T_2 + T_3$. Кинетическая энергия большой пробки есть

$$T_1 = \frac{1}{2}J_1\dot{\varphi}_1^2,$$

где J_1 – осевой момент инерции большой пробки относительно вертикальной оси, проходящей через точку O_1. Кинетическая энергия средней пробки определяется формулой

$$T_2 = \frac{1}{2}m_2{v_{0_2}}^2 + \frac{1}{2}J_2\omega_2^2 + m_2\left(\overrightarrow{v_{0_2}}, \overrightarrow{v_{c_2}}\right),$$

где m_2 – масса средней пробки, J_2 – осевой момент инерции средней пробки относительно вертикальной оси, проходящей через точку O_2, $\vec{v}'_{c_2}$ – относительная скорость точки C_2 в системе координат, движущейся поступательно со скоростью $\overrightarrow{v_{0_2}}$ относительно неподвижной системы координат. В результате имеем

$$T_2 = \frac{1}{2} m_2 l_2^2 \dot{\varphi}_1{}^2 + \frac{1}{2} J_2 (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2 + m_2 l_2 a_2 \dot{\varphi}_1 (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) \cos \varphi_2,$$

где $l_2 = \left|\overrightarrow{O_1 O_2}\right|$, $a_2 = \left|\overrightarrow{O_2 C_2}\right|$. Кинетическая энергия малой пробки определяется формулой

$$T_3 = \frac{1}{2} J_3 (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3)^2 + \frac{1}{2} m_3 \big(l_2^2 \dot{\varphi}_1{}^2 + l_3^2 (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2 + 2 l_2 l_3 \dot{\varphi}_1 (\dot{\varphi}_1 + \\ + \dot{\varphi}_2) \cos(\varphi_2 + \alpha) \big) + m_3 a_3 (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3)(l_2 \dot{\varphi}_1 \cos(\varphi_2 + \varphi_3) + l_3 (\dot{\varphi}_1 + \\ + \dot{\varphi}_2) \cos(\varphi_3 - \alpha)),$$

где m_3 – масса малой пробки, J_3 – осевой момент инерции малой пробки относительно вертикальной оси, проходящей через точку O_3, $l_3 = \left|\overrightarrow{O_2 O_3}\right|$, $a_3 = \left|\overrightarrow{O_3 C_3}\right|, \alpha = LC_2 O_2 O_3$.

Суммарная кинетическая энергия механизма будет следующей

$$T = \frac{1}{2} \left(J_1 + (m_2 + m_3) l_2{}^2 \right) \dot{\varphi}_1{}^2 + \frac{1}{2} \left(J_2 + m_3 l_3{}^2 \right) (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2 + \frac{1}{2} J_3 (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2 + \\ + \dot{\varphi}_3)^2 + (m_2 l_2 a_2 \cos \varphi_2 + m_3 l_2 l_3 \cos(\alpha + \varphi_2)) \dot{\varphi}_1 (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) + m_3 l_2 a_3 \cos(\varphi_2 + \\ + \varphi_3) \dot{\varphi}_1 (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3) + m_3 l_3 a_3 (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3) \cos(\varphi_3 - \alpha). \qquad (1)$$

С помощью (1) составим уравнения Лагранжа 2 рода [6]

$$J_1 \ddot{\varphi}_1 + J_2 (\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) + J_3 (\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2 + \ddot{\varphi}_3) + m_2 [l_2{}^2 \ddot{\varphi}_1 + l_2 a_2 (\cos \varphi_2 (2 \ddot{\varphi}_1 + \\ + \ddot{\varphi}_2) - \sin \varphi_2 \dot{\varphi}_2 (2 \dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2))] + m_3 [l_2{}^2 \ddot{\varphi}_1 + l_3{}^2 (\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) + l_2 l_3 (\cos(\varphi_2 + \\ + \alpha) (2 \ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) - \sin(\varphi_2 + \alpha) \dot{\varphi}_2 (2 \dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)) + l_2 a_3 (\cos(\varphi_2 + \varphi_3) (2 \ddot{\varphi}_1 + \\ + 2 \ddot{\varphi}_2 + \ddot{\varphi}_3) - \sin(\varphi_2 + \varphi_3)(\dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3)(2 \dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3)) + l_3 a_3 (\cos(\varphi_3 - \\ - \alpha) (2 \ddot{\varphi}_1 + + 2 \ddot{\varphi}_2 + \ddot{\varphi}_3) - \sin(\varphi_3 - \alpha) \dot{\varphi}_3 (2 \dot{\varphi}_1 + 2 \dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3))] = u_1 \qquad (2)$$

$$J_2 (\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) + J_3 (\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2 + \ddot{\varphi}_3) + m_2 l_2 a_2 \left(\cos \varphi_2 \, \ddot{\varphi}_1 + \sin \varphi_2 \, \dot{\varphi}_1{}^2 \right) + \\ + m_3 \left[l_3^2 (\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) + l_2 l_3 \left(\cos(\varphi_2 + \alpha) \, \ddot{\varphi}_1 + \sin(\varphi_2 + \alpha) \, \dot{\varphi}_1{}^2 \right) + l_2 a_3 \left(\cos(\varphi_2 + \\ + \varphi_3) \, \ddot{\varphi}_1 + \sin(\varphi_2 + \varphi_3) \, \dot{\varphi}_1{}^2 \right) + l_3 a_3 (\cos(\varphi_3 - \alpha) \, (2 \ddot{\varphi}_1 + 2 \ddot{\varphi}_2 + \ddot{\varphi}_3) - \\ - \sin(\varphi_3 - \alpha) \, \dot{\varphi}_3 (2 \dot{\varphi}_1 + 2 \dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3))] = u_2, \qquad (3)$$

$$J_3 (\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2 + \ddot{\varphi}_3) + m_3 [l_2 a_3 (\cos(\varphi_2 + \varphi_3) \, \ddot{\varphi}_1 + \sin(\varphi_2 + \varphi_3) \, \dot{\varphi}_1{}^2) + \\ + l_3 a_3 (\cos(\varphi_3 - \alpha) \, (\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) + \sin(\varphi_3 - \alpha) \, (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2] = u_3 \qquad (4)$$

Математическая модель вращения большой и средней пробок

Операция перегрузки будет осуществляться следующим образом: сначала будут одновременно разворачиваться большая и средняя пробки (малая пробка при этом замораживается, т.е. φ_3=*const*).

Согласно (2) и (3)

$$J_1\ddot{\varphi}_1 + J_2(\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) + J_3(\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) + m_2[{l_2}^2\ddot{\varphi}_1 + l_2a_2(\cos\varphi_2(2\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) -$$
$$- \sin\varphi_2\dot{\varphi}_2\,(2\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2))] + m_3[{l_2}^2\ddot{\varphi}_1 + {l_3}^2(\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) + l_2l_3\,(\cos(\varphi_2 + \alpha)\,(2\ddot{\varphi}_1 +$$
$$+\ddot{\varphi}_2) - \sin(\varphi_2 + \alpha)\,\dot{\varphi}_2(2\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)) + l_2a_3(\cos\varphi_2\,(2\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) -$$
$$- \sin\varphi_2\,\dot{\varphi}_2)(2\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) + l_3a_3\cos\alpha\,(2\ddot{\varphi}_1 + 2\ddot{\varphi}_2) = u_1 \qquad (5)$$

$$J_2(\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) + J_3(\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) + m_2l_2a_2\left(\cos\varphi_2\,\ddot{\varphi}_1 + \sin\varphi_2\,{\dot{\varphi}_1}^2\right) + m_3\left[l_3^2(\ddot{\varphi}_1 +\right.$$
$$+\ddot{\varphi}_2) + l_2l_3\,\left(\cos(\varphi_2 + \alpha)\,\ddot{\varphi}_1 + \sin(\varphi_2 + \alpha)\,{\dot{\varphi}_1}^2\right) + l_2a_3\left(\cos\varphi_2\,\ddot{\varphi}_1 +\right.$$
$$\left.+ \sin\varphi_2\,{\dot{\varphi}_1}^2\right) + l_3a_3\cos\alpha\,(2\ddot{\varphi}_1 + 2\ddot{\varphi}_2)] = u_2 \qquad (6)$$

Далее будем полагать, что

$$\alpha = \pi,\ l_3 = a_3 + \frac{m_2}{m_3}a_2. \qquad (7)$$

При сделанных предположениях (7) система дифференциальных уравнений (5), (6) примет вид:

$$[J_1 + J_2 + J_3 + m_2l_2^2 + m_3(l_2^2 + l_2^2)]\ddot{\varphi}_1 + [J_2 + J_3 + m_3l_3^2]\ddot{\varphi}_2 = u_1,$$

$$[J_2 + J_3 + m_3l_3^2](\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) = u_2.$$

Разрешим эту систему относительно $\ddot{\varphi}_1$ и $\ddot{\varphi}_2$. В результате получим

$$\ddot{\varphi}_1 = q(u_1 - u_2), \qquad (8)$$

$$\ddot{\varphi}_2 = -qu_1 + (q + p)u_2, \qquad (9)$$

где

$$p = \frac{1}{J_2 + J_3 + m_3(l_3^2 - 2\,l_2a_3)},\ \ q = \frac{1}{J_1 + (m_2 + m_3)l_2^2}.$$

Оптимизация времени разворота трех пробок

Далее будем рассматривать задачу о перемещении захвата сначала с помощью вращения большой и средней пробок, а затем, одной малой пробки. Предположим, что в заключительный момент захват должен находиться в точке Q_f с координатами x^f, y^f. В связи с этим, в момент завершения вращения большой и малой пробок t_1 и начала вращения малой пробки, центр малой пробки O_3 должен находиться на окружности радиуса R_3 с центом в точке x^f, y^f, т.е. на окружности

$$\left(x - x^f\right)^2 + \left(y - y^f\right)^2 = {R_3}^2 \qquad (10)$$

в некоторой точке $\bar{Q}$ с координатами $\bar{x}, \bar{y}$.

Не трудно показать, что декартовы координаты центра малой пробки связаны с угловыми координатами следующим образом:

$$x(O_3) = l_2\cos\varphi_1 - l_3\cos(\varphi_1 + \varphi_2)\,, \qquad (11)$$

$$y(O_3) = l_2 \sin\varphi_1 - l_3 \sin(\varphi_1 + \varphi_2). \qquad (12)$$

Ниже на рис. 2 показаны положения расположения геометрических центров и центров масс большой, средней и малой пробок.

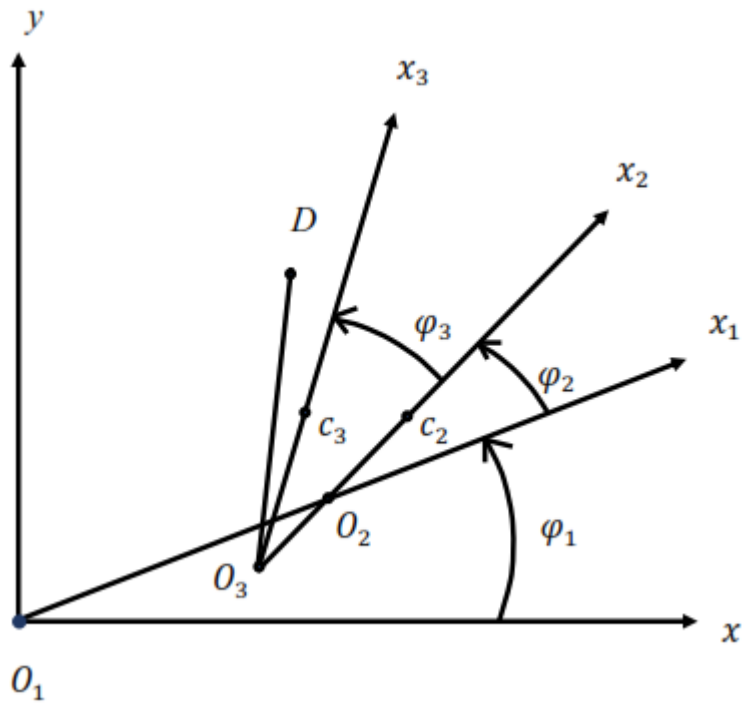


Рисунок 2 – Взаимное расположение центров масс и геометрических центров вращающихся пробок

Обозначим угол между прямой O_1O_3 и осью x через φ_1^*. Для этого угла справедлива формула

$$\varphi_1^* = \arccos\frac{x(O_3)}{\sqrt{x^2(O_3)+y^2(O_3)}}\ sign\ y(O_3)\,.$$

Согласно теореме косинусов

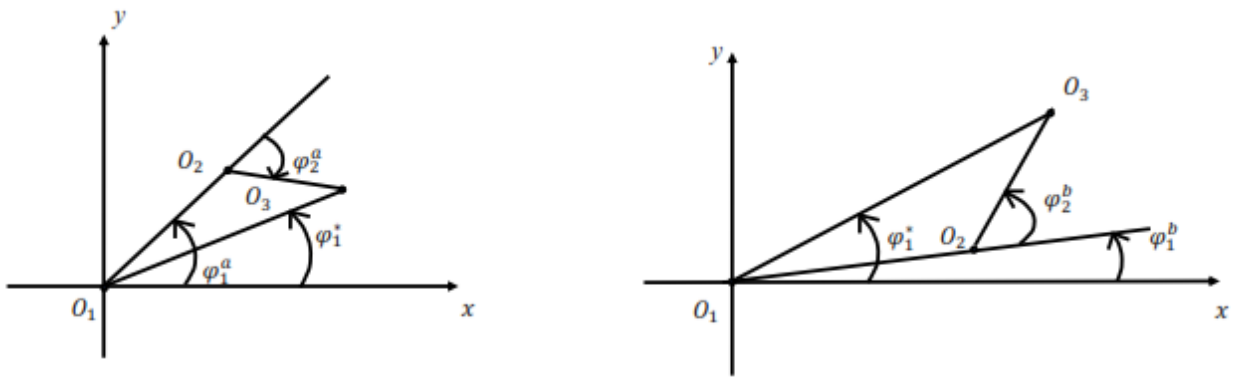
$$\cos LO_3O_1O_2 = \frac{l_3^2 - l_2^2 - x^2(O_3) - y^2(O_3)}{2l_2\sqrt{x^2(O_3)+y^2(O_3)}},$$

и, соответственно,

$$LO_3O_1O_2 = \arccos\frac{l_3^2 - l_2^2 - x^2(O_3) - y^2(O_3)}{2l_2\sqrt{x^2(O_3)+y^2(O_3)}}.$$

Тогда в случае а) (смотри рисунок 3а)

$$\varphi_1^a = \varphi_1^* + LO_3O_1O_2,$$



a) b)

Рисунок 3 – возможные варианты для углов $\varphi_1^a, \varphi_1^b, \varphi_2^a, \varphi_2^b$

и в случае b)

$$\varphi_1^b = \varphi_1^* - LO_3O_1O_2.$$

Для угла $LO_3O_2O_1$ справедливо представление

$$\cos LO_3O_2O_1 = \frac{x^2(O_3) + y^2(O_3) - l_3^2 - l_2^2}{2l_2l_3},$$

Для углов φ_2^a и φ_2^b имеют место формулы

$$\varphi_2^a = LO_3O_2O_1 - \pi, \tag{13}$$

$$\varphi_2^b = \pi - LO_3O_2O_1. \tag{14}$$

Формулы (13)-(14) позволяют по известным декартовым координатам точки O_3 найти соответствующие значения углов φ_1 и φ_2 (два варианта).

Заменим окружность (10) на дискретное множество (общее число точек на окружности – l). В дальнейшем по этому множеству мы будем осуществлять одномерную оптимизацию.

$$x_k = x^f + R_3 \cos k\frac{2\pi}{l} \qquad (k = 0,1,\dots,l-1)$$

$$y_k = y^f + R_3 \sin k\frac{2\pi}{l} \tag{15}$$

Для точки (x_k, y_k) определяем пары углов $(\varphi_{1k}^a, \varphi_{2k}^a)$, $(\varphi_{1k}^b, \varphi_{2k}^b)$ по формулам (11), (12), (13), (14). Согласно [5] оптимальное время перехода из позиции $(\varphi_{10}, \varphi_{20})$ в позицию $(\varphi_{1k}^a, \varphi_{2k}^a)$ (или $(\varphi_{1k}^b, \varphi_{2k}^b)$) определяется формулой

$$\vartheta_1 = 2\sqrt{\frac{|q+p||\varphi_{1k} - \varphi_{10} + \frac{q}{q-p}(\varphi_{2k} - \varphi_{20})|}{\mu_1 qp}}, \tag{16}$$

если

$$|q+p||\varphi_{1k}-\varphi_{10}+\frac{q}{q-p}(\varphi_{2k}-\varphi_{20})| \geq \frac{\mu_1}{\mu_2}\, q\, |\varphi_{1k}-\varphi_{10}+\ \varphi_{2k}-\varphi_{20}|, \quad (17)$$

и формулой

$$\vartheta_2 = 2\sqrt{\frac{|\varphi_{1k}-\varphi_{10}+\ \varphi_{2k}-\varphi_{20}|}{\mu_2 p}}, \quad (18)$$

если

$$|q+p||\varphi_{1k}-\varphi_{10}+\frac{q}{q-p}(\varphi_{2k}-\varphi_{20})| \leq \frac{\mu_1}{\mu_2}\, q\, |\varphi_{1k}-\varphi_{10}+\ \varphi_{2k}-\varphi_{20}|. \quad (19)$$

Определим на какой угол нужно развернуть малую пробку, чтобы привести захват в точку Z^f, имеющую координаты (x^f, y^f). Этот угол будем обозначать $\Delta\varphi_3^f$. Согласно (11), (12)

$$\overrightarrow{O_2O_3} = -l_3(\cos(\varphi_1+\ \varphi_2); \sin(\varphi_1+\ \varphi_2)).$$

Очевидно, что

$$\overrightarrow{O_3Z^f} = (x^f - l_2\cos\varphi_1 + l_3\cos(\varphi_1+\ \varphi_2); y^f - l_2\sin\varphi_1 + l_3\sin(\varphi_1+\ \varphi_2)).$$

Тогда

$$\cos L\, DO_3Z^f = -\frac{l_3}{R_3^2}\,(\cos(\varphi_1+\ \varphi_2)\,(x^f - l_2\ \cos\varphi_1 + l_3\cos(\varphi_1+\ \varphi_2) +$$

$$+\sin(\varphi_1+\ \varphi_2)\,(y^f - l_2\sin\varphi_1 + l_3\sin(\varphi_1+\ \varphi_2)) = S\big(x^f, y^f, \varphi_1, \varphi_2\big).$$

Введем обозначения:

$$\alpha_1 = |\arccos S\big(x^f, y^f, \varphi_1, \varphi_2\big) + \varphi_{30} + \varphi_3^*|$$

и

$$\alpha_2 = |2\pi - \arccos S\big(x^f, y^f, \varphi_1, \varphi_2\big) - \varphi_{30} - \varphi_3^*|.$$

Тогда $|L\, DO_3Z^f| = \min\{\alpha_1, \alpha_2\}$. Очевидно, что

$$|\Delta\varphi_3^f| = |L\, DO_3Z^f| = \min\{\alpha_1, \alpha_2\} \quad (20)$$

и

$$0 \leq |\Delta\varphi_3^f| \leq\ \pi.$$

Согласно (4) уравнение движения малой пробки при фиксированных большой и средней пробках будет иметь вид

$$J_3\ddot{\varphi}_3 =\ u_3.$$

В этом случае, как показано в [4,5], оптимальное время разворота малой пробки на угол $\Delta\varphi_3^f$ будет равно

$$\vartheta_3 = 2\sqrt{\frac{J_3\,|\Delta\varphi_3^f|}{\mu_3}}. \qquad (21)$$

В результате для каждой точки, полученной при дискретизации окружности (10) (см. (15)), суммарное время разворота трех пробок будет определяться формулой

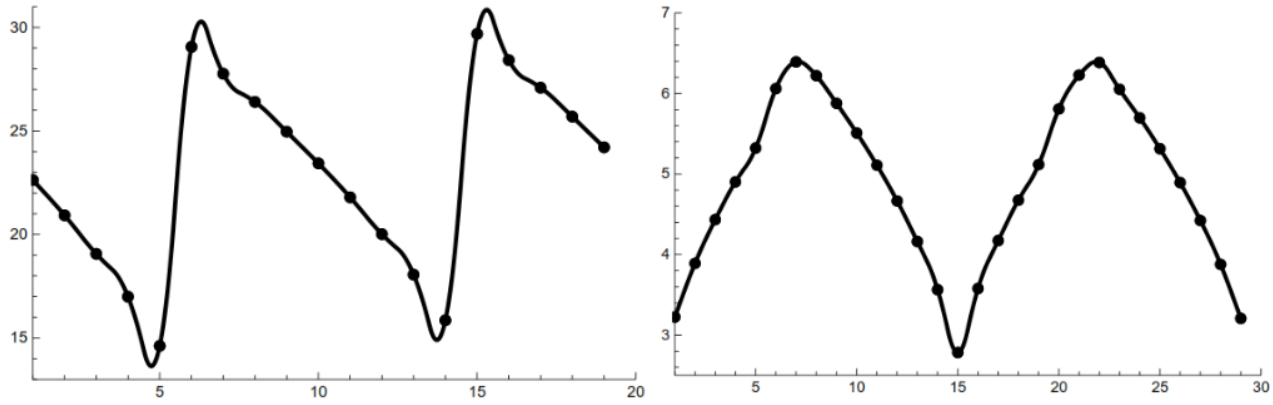
$$\vartheta = \vartheta_1^* + \vartheta_3, \qquad (22)$$

где $\vartheta_1^* = \vartheta_1$ если выполняется условие (17) и $\vartheta_1^* = \vartheta_2$, если выполняется условие (19), величины $\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3$ задаются формулами (16), (18) и (21). Далее суммарное время на разворот трех пробок ϑ минимизируется по всем точкам из формулы (15).

Численный эксперимент

Задача вычисления минимального значения величины (22) на окружности (10) после ее дискретизации (15) решается простым перебором. Для каждой точки из (15) вычисляется значение (22) и из этих значений выбирается минимальное.

На графике 4 а) представлен результат оптимизации суммарного времени разворота двух пробок в предположении, что начальное условие задается угловыми координатами $\varphi_1^0 = 80^\circ$, $\varphi_2^0 = 10^\circ$, $\varphi_3^0 = 10^\circ$. Конечная точка Q^f имеет координаты (-0.13; -0.79). На оси абсцисс откладывается номер точки на окружности (15). На оси ординат откладывается суммарное время разворота всех трех пробок. Дискретизация окружности (15) производилась с шагом 0,33 радиан.



a) b)

Рисунок 4 – вычислительный эксперимент

График 4 b) представляет вариант оптимизации суммарного времени разворота трех пробок при начальных условиях $\varphi_1^0 = 10^\circ$, $\varphi_2^0 = 20^\circ$, $\varphi_3^0 = 20^\circ$. У конечной точки Q^f – координаты (-0.07; -0.79). Дискретизация окружности (15) в этом случае проводилась с шагом 0,21 радиан.

Заключение

В статье предложена математическая модель перегрузочного устройства для реактора на быстрых нейтронах БН-800, в которой не предполагается совпадение центров масс и геометрических центров вращающихся пробок машины перегрузки ядерного топлива. При предположении, что одновременно могут вращаться лишь большая и средняя пробки, предложен алгоритм, обеспечивающий наведение захвата механизма перегрузки на заданную точку за минимальное время. Применение такого алгоритма будет способствовать сокращению времени, требуемого на перегрузку ядерного топлива, и приведет к сокращению времени остановки энергоблока АЭС.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, Государственный контракт № 075-03-2020-582/4.

Библиографический список

1. Ташлыков О. Л. Эксплуатация и ремонт ядерных паропроизводящих установок АЭС. В 2 кн. Кн. 1 / О. Л. Ташлыков, А. Г. Кузнецов, О. Н. Арефьев. – Москва : Энергоатомиздат, 1995. – 256 с. – ISBN 5-283-03609-X.
2. Коробкин В. В. Методы маршрутизации и их приложения в задачах повышения безопасности и эффективности эксплуатации атомных станций / В. В. Коробкин, А. Н. Сесекин, О. Л. Ташлыков, А. Г. Ченцов. – Москва : Новые технологии, 2012. – 234 с. – ISBN 978-5-94694-027-6.
3. Бельтюков А. И. Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем : учеб. пособие / А. И. Бельтюков, А. И. Карпенко, С. А. Полуяктов [и др.]. – Екатеринбург : УрФУ, 2013. – 548 с.
4. Sequential optimal control of the nuclear fuel reload mechanism / Yu. F. Dolgii, A. Sesekin, O. L. Tashlykov, K. T. Tran. – DOI 10.1063/1.5133551 // AIP Conference Proceeding. – 2019. – Vol. 2172. – P. 070015.
5. Optimal Control of the System of Coupled Cylinders / Yu.F. Dolgii, A. A. Petunin, A. N. Sesekin, O. L. Tashlykov. – DOI 10.1063/1.5082025 // AIP Conference Proceeding. – 2018. – Vol. 2048. – P. 020007.
6. Аппель П. Теоретическая механика. Т. 1 / П. Аппель. – Москва : ФИЗМАТГИЗ, 1960. – 515 с.

УДК 621.039

Костарев В. С., Ширманов И. А., Литвинов Д. Н., Щеклеин С. Е.

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕАКТОРА ВВЭР-1200 ПРИ ПОМОЩИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация. На сегодняшний день атомные и тепловые электрические станции составляют наибольшую часть энергетической системы России (около 67%). Основная часть действующих в мире АЭС используют реакторы на тепловых нейтронах, которые обеспечивают относительно низкие начальные параметры водяного пара для паротурбинных установок, которые влекут за собой небольшие значения термического КПД (30-35%). Самым распространенным в атомной энергетике типом реактора является реактор с водой под давлением (ВВЭР или PWR). Для решения задачи нахождения оптимальных термодинамических параметров пара в реакторах ВВЭР было проведено моделирование различных вариантов тепловых схем ВВЭР-1200 при различных параметрах пара при помощи САПР United Cycle с целью нахождения зависимости значения КПД от термодинамических параметров. Рассматривались различные термодинамические параметры пара с целью получения наибольшего значения КПД нетто в заданном диапазоне допустимых параметров и построения графика зависимости КПД нетто от давления в парогенераторе ЯЭУ.

Ключевые слова: ВВЭР-1200, тепловая схема АЭС, компьютерное моделирование, оптимизация термодинамических параметров пара.

Abstract. Today, nuclear and thermal power plants make up the largest part of the Russian energy system (about 67%). The majority of nuclear power plants operating in the world use thermal neutron reactors, which provide relatively low initial parameters of steam for steam turbine plants, which entail low thermal efficiency values (30-35%). The most common type of reactor in nuclear power engineering is a pressurized water reactor (VVER or PWR). To solve the problem of finding the optimal thermodynamic parameters of steam in VVER reactors, various variants of VVER-1200 thermal schemes for various steam parameters using United Cycle CAD system were simulated in order to find the dependence of the efficiency value on thermodynamic parameters. Various thermodynamic parameters of steam were considered in order to obtain the highest value of the net efficiency in a given range of permissible parameters and to plot the dependence of the net efficiency on the pressure in the steam generator of the nuclear power plant.

Keywords: VVER-1200, NPP steam-cycle arrangement, computer simulation, optimization of thermodynamic parameters of steam.

Введение

Повышение энергоэффективности экономики страны является одной из приоритетных задач. Для достижения этой цели в атомной энергетике рассматривают следующие пути:

– увеличение глубины выгорания ядерного топлива;

– повышение установленной мощности действующих энергоблоков путем модернизации оборудования;
– повышение коэффициентов полезного действия АЭС путем совершенствования тепловых схем и термодинамических циклов;
– повышение коэффициентов использования установленной мощности (КИУМ);
– снижение расходов тепловой и электрической энергии на собственные нужды АЭС;
– снижение непроизводительных расходов и потерь энергии;
– использование низкопотенциальной сбросной тепловой энергии.

Наряду с данными задачами, решаемыми эволюционным путем, рассматриваются многочисленные инновационные проекты, способные радикально повысить экологическую, энергетическую и экономическую эффективность атомной энергетики.

Технологический цикл АЭС с реакторами на тепловых нейтронах с водным теплоносителем (ЛВР) обладает следующими особенностями [1]:

– выбор современного давления в первом контуре реакторов ЛВР большой мощности (15,7 МПа) связан с ограничением по температуре, равным 350°С для оболочек твэлов из циркониевых сплавов. Отсюда следует, что предельная температура пара во втором контуре не может превысить 315°С в случае его перегрева. Таким образом, выбор циркониевого сплава для оболочек твэлов и повышение единичной мощности блоков практически предопределили термодинамические параметры АС с ЛВР: давление первого контура около 16 МПа, температура теплоносителя на выходе из реактора 320 – 330°С; давление и температура пара во втором контуре соответственно 6,3-7,2 МПа и 279-285°С.
– высокая мощность турбоустановок достигается большими расходами пара, что влияет на потери тепловой энергии в конденсаторе паровой турбины. Повышенные невосполнимые тепловые потери в холодном источнике снижают экономичность работы таких энергоблоков, поэтому КПД брутто современных атомных электростанций, как правило, не превышает 32-35 %.

Известно, что максимальная термодинамическая эффективность паросиловых циклов достигается при одновременном повышении начальной температуры и начального давления пара.

В данной работе предложен вариант решения задачи нахождения оптимальных термодинамических параметров пара в реакторах ВВЭР-1200 при помощи компьютерного моделирования тепловой схемы турбоустановки в САПР

United Cycle. В ходе моделирования были построены различные варианты тепловых схем ВВЭР-1200 при различных параметрах пара с целью нахождения зависимости значения КПД от термодинамических параметров. Рассматривались различные термодинамические параметры пара с целью получения наибольшего значения КПД в заданном диапазоне допустимых параметров и построения графика зависимости КПД от давления в парогенераторе.

Математическое моделирование тепловых схем АЭС

При разработке, проектировании и создании сложных объектов (ТЭС и АЭС) требуются знания о количественных и качественных закономерностях, свойственных рассматриваемым системам; эти сведения могут быть получены на базе метода математического моделирования.

Согласно основным положениям моделирования энергоустановок ТЭС и АЭС, математическая модель дает формализованное и приближенное (с определенной степенью точности) описание реальной картины количественных и логических взаимосвязей и соотношений между основными параметрами рассматриваемого объекта, технологическими и материальными характеристиками его элементов, характеристиками внешних технологических и экономических связей, системой ограничений и соответствующим критерием эффективности [2].

Для создания математической модели тепловой и атомной энергетических установок моделируемый объект выделяется как характерное генерирующее звено энергосистемы. Внешние технологические и экономические связи заменяются их обобщенным описанием или количественными характеристиками. При этом сама энергоустановка рассматривается как единый сложный комплекс разнородных элементов оборудования и сооружений, предназначенный для выработки электроэнергии, теплоты, вторичного ядерного топлива путем одновременного, непрерывного осуществления различных взаимосвязанных процессов реального цикла. Всякое изменение любого параметра или элемента энергоустановки в той или иной степени влияет на параметры, характеристики и показатели всего комплекса.

Конечной целью математического моделирования и комплексной оптимизации АЭС является выбор оптимального вида технологической схемы и значений ее параметров, конструктивно-компоновочных решений по оборудованию.

Для адекватного описания состояния энергоустановки необходимо знать параметры рабочего тела во всех точках тепловой схемы. Технологически потоки рабочего тела связывают между собой конкретные элементы оборудования. В

зависимости от типа и назначения установки она может включать в себя те или иные типы оборудования. По функциональному назначению все оборудование может быть разбито на следующие группы:

- турбина, которая включает в себя отсеки расширения, смесители пара и камеры отбора;
- арматура: задвижки, стопорные и регулирующие клапаны;
- – насосы;
- теплообменные аппараты: охладители пара и дренажа, подогреватели различных типов, конденсаторы, деаэраторы и т. п.,
- прочие элементы.

Вне зависимости от места в тепловой схеме функциональное назначение и агрегатное состояние рабочего тела, участвующего в процессах внутри элемента оборудования, остается одним и тем же. Например, в подогревателе поверхностного типа происходит теплообмен между паром и водой в процессе конденсации пара. В условиях статического равновесия этот процесс упрощенно может быть описан следующим образом.

Расход воды на входе в подогреватель равен расходу его из подогревателя, расход греющего пара в подогреватель равен расходу дренажа из подогревателя, количество теплоты, приобретенной водой, равно разности теплосодержания греющего пара и дренажа. При таком описании неважно, понимаем ли мы в качестве воды основной конденсат, питательную или сетевую воду, т. е. играет ли подогреватель роль ПНД, ПВД или ПСГ. Кроме того, тот же подогреватель поверхностного типа может содержать охладители дренажа и пара. Функциональное назначение последних и их математическое описание не зависят от того, встроен ли охладитель в подогреватель или расположен отдельно как самостоятельная технологическая единица.

Проведя аналогичный анализ для всех других элементов оборудования энергоустановок различного типа, можно установить минимальный по составу перечень элементов, для которых необходимо построить математические модели, чтобы полностью описать всю установку в целом. На содержание перечня оказывает, правда, влияние алгоритм решения системы уравнений, описывающей всю установку в целом.

Пакет United Cycle предназначен для решения задач определения наилучших структуры и состава оборудования теплоэнергетического объекта и расчета стационарных эксплуатационных режимов работы. Пакет предназначен для инженеров-теплоэнергетиков, специализирующихся на расчетах тепловых схем энергоустановок [3].

Пакет United Cycle строится на алгоритме, в котором решение системы нелинейных уравнений ищется в едином итерационном процессе без разбиения исходного графа на подграфы. Этот алгоритм учитывает специфику изменения параметров в графе, соответствующем технологическому процессу, и обеспечивает решение системы уравнений во всем диапазоне эксплуатационных нагрузок не только отдельного энергоблока, но и всей электростанции в целом.

Пакет United Cycle отличает:

- высокая степень детализации тепловой схемы моделируемого объекта,
- выверенные и отлаженные в течение многолетней эксплуатации модели элементов оборудования
- высокая точность сведения материального и теплового баланса
- многоуровневая система тестирования на каждом шаге создания модели, расчета и анализа результатов режимов работы
- высокоразвитая графическая среда разработки и визуализации результатов.

В рамках пакета United Cycle (UC) создание модели энергоустановки превращается в триединую задачу, требующую квалификации инженера-теплоэнергетика, определенных дизайнерских навыков и аккуратности. Во-первых, необходимо из стандартных изображений элементов оборудования набрать тепловую схему моделируемого объекта. Эта схема полностью определит структуру уравнений математической модели. Во-вторых, чтобы перейти к реальной энергоустановке, необходимо каким-то образом задать численные значения коэффициентов уравнений математической модели. И, в-третьих, для графического представления результатов расчетов режимов работ необходимо построить выходную форму – упрощенное изображение части или всей тепловой схемы, на которое в определенные места будут выводиться результаты расчетов. И только после этого можно переходить непосредственно к расчетам.

Постановка задачи

На рис. 1 представлена тепловая схема, построенная в United Cycle для дальнейших расчетов.

Для расчета в САПР United Cycle была построена тепловая схема ЯЭУ ВВЭР-1200, для которой в дальнейшем задавались начальные параметры. В таблице 1 приведены начальные параметры каждой из рассчитываемых схем.

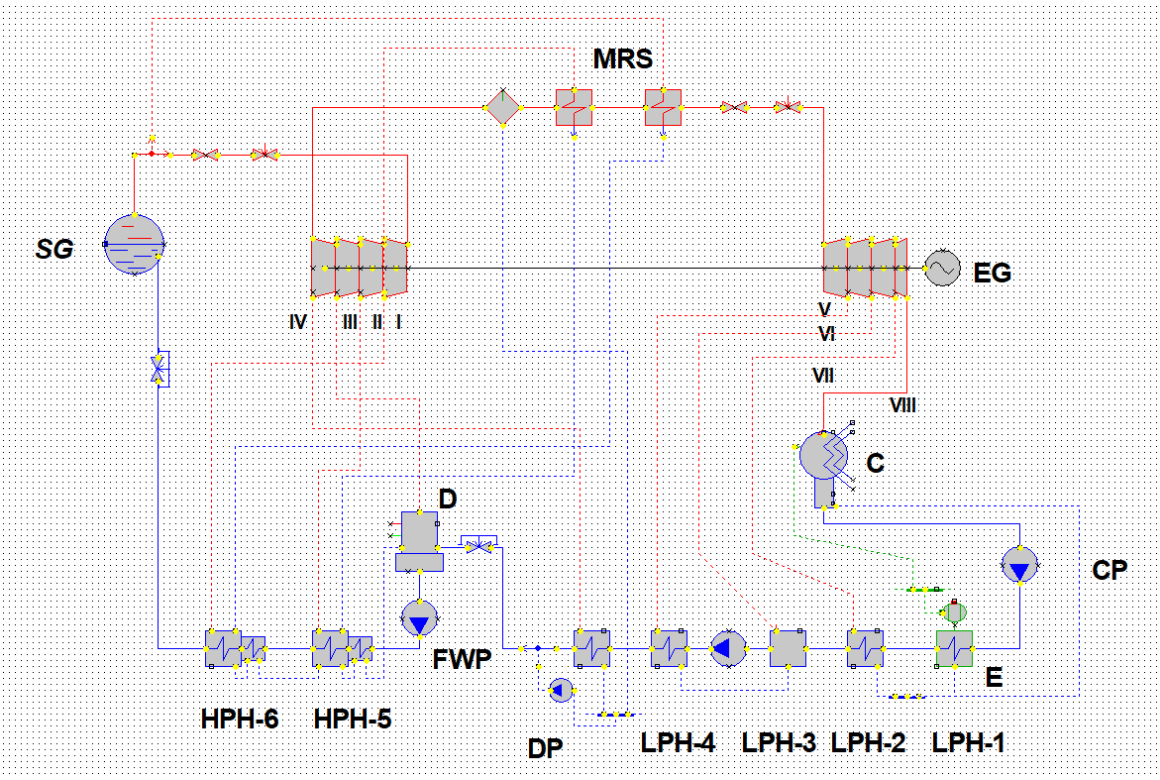


Рисунок 1 – Тепловая схема ВВЭР-1200, созданная в United Cycle: I, II, III, IV, V, VI, VII, VII – отсеки турбины; D – деаэратор; DP – дренажный насос; C – конденсатор; CP -– конденсатный насос; SG – парогенератор; LPH-1, 2, 3, 4 – подогреватели низкого давления, HPH-5, 6 – подогреватели высокого давления, FWP – питательный электронасос, E – эжектор; EG – электрогенератор

Таблица 1 – Начальные параметры рассчитываемых вариантов тепловых схем

№ схемы п/п	P, МПа	T, °C
1	6,0	275,59
2	6,5	280,86
3 (стандартная схема)	6,79	283,78
4	7,0	285,83
5	7,5	290,54
6	7,8	293,25

Расход пара во всех случаях принимался равным стандартному расходу пара в тепловой схеме ВВЭР-1200 – 6495,9 т/ч.

Результаты

По результатам расчетов в United Cycle были определены КПД нетто и электрические мощности каждого из вариантов схем, а также построена кривая зависимости КПД от начального давления.

Значения КПД нетто и электрических мощностей приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Значения КПД нетто и электрических мощностей рассчитанных вариантов тепловых схем

№ схемы п/п	КПД нетто	$N_э$, МВт
1	0,301	1090
2	0,330	1112
3	0,350	1136
4	0,353	1154
5	0,357	1172
6	0,355	1186

На рис. 2 представлена кривая зависимости КПД нетто от давления пара в парогенераторе.

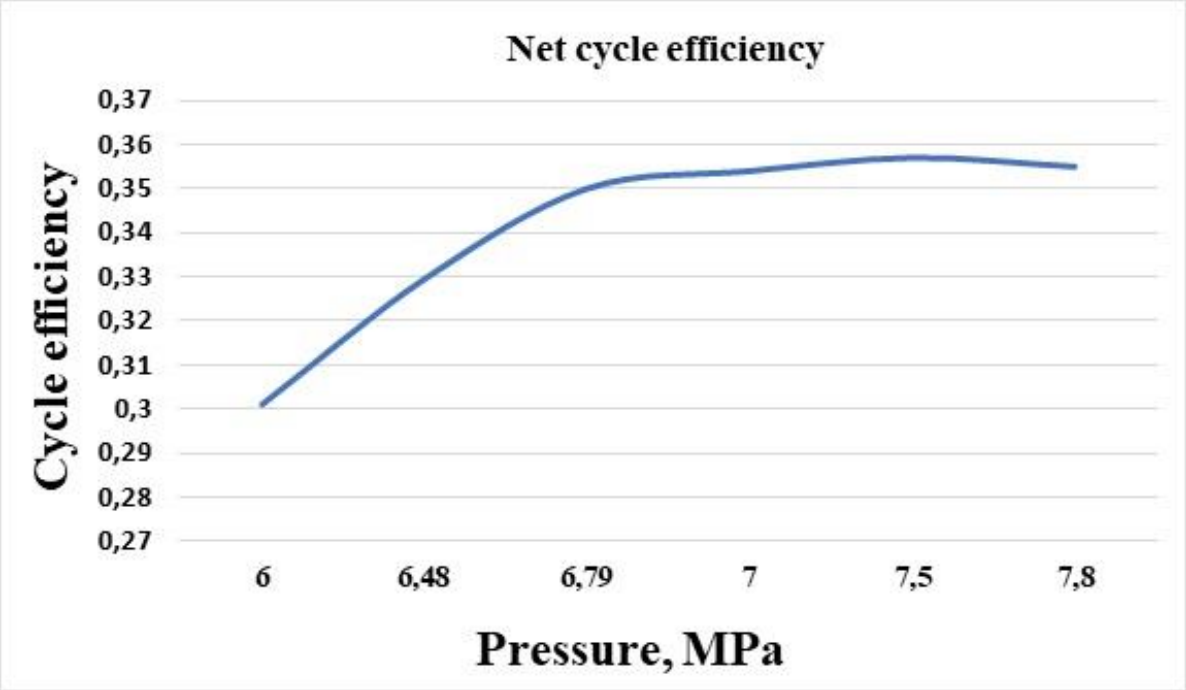


Рисунок 2 – Кривая зависимости КПД нетто от давления пара в парогенераторе

Для варианта схемы с наибольшим значением КПД (P=7,5 МПа) в United Cycle также была построена h-s диаграмма процесса расширения пара в турбине (рис. 3).

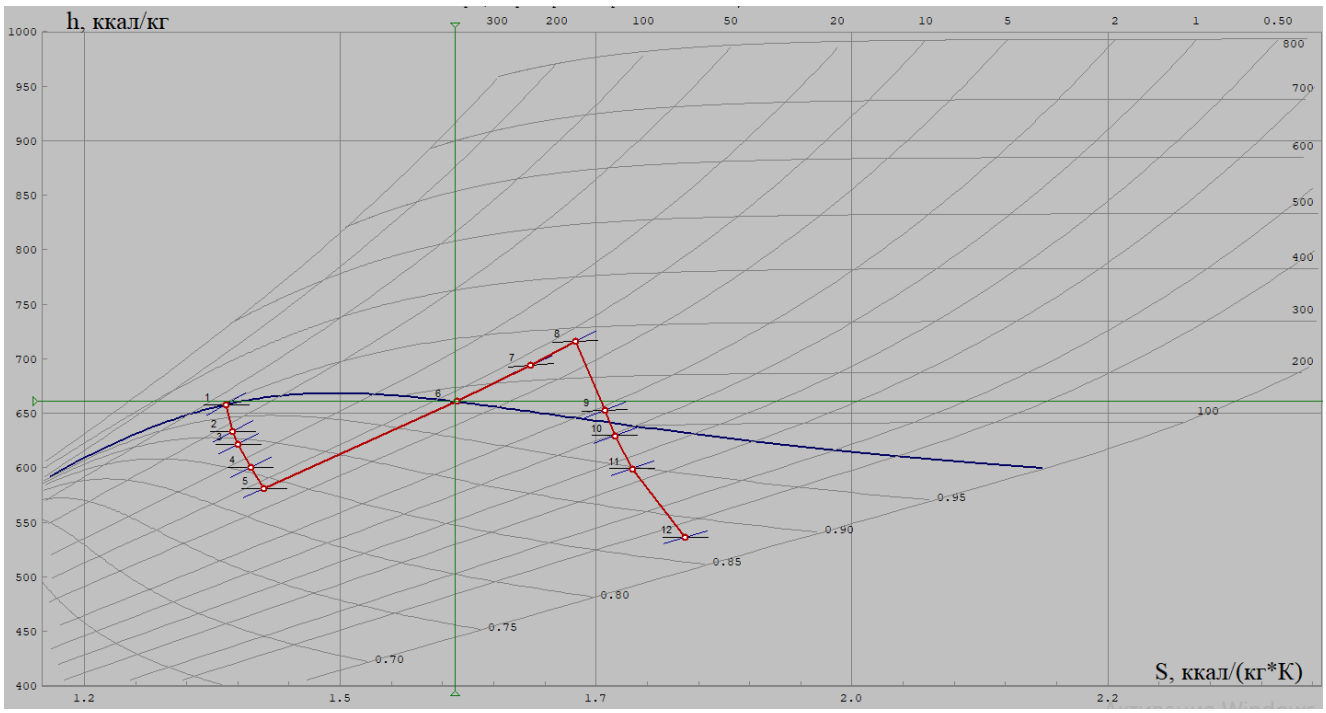


Рисунок 3 – h-s диаграмма расширения пара в турбине при давлении 7,5 МПа

Из графика видно, что с увеличением давления пара в парогенераторе начинает расти и КПД, однако этот рост при больших значениях давления начинает замедляться и достигает максимума в районе 7,5 МПа, после чего начинает падать. Таким образом, можно сделать вывод, что повышение начальных параметров пара в ВВЭР-1200 целесообразно только до области, находящейся в районе 7.5 МПа, поскольку дальнейшее увеличение давления приведет лишь к падению КПД.

h-s диаграмма же достаточно схожа с h-s диаграммой стандартного цикла ВВЭР-1200, за исключением того, что расширение пара происходит при несколько более высоких параметрах.

Заключение

Результаты моделирования показали, что оптимальным вариантом начальных параметров ВВЭР-1200, при котором обеспечивается наивысший КПД, из числа рассматриваемых в данной работе, является комбинация давления P=7,5 МПа и температуры T=290,54 °C, что обеспечивает значение КПД нетто 0,357 и электрическую мощность установки 1172 МВт.

Дальнейшее повышение давления является нецелесообразным, поскольку при таких значениях начальных параметров КПД начинает падать.

Определение оптимальных начальных параметров позволяет повысить электрическую мощность, вырабатываемую АЭС, и коэффициент полезного действия. Дальнейшее совершенствование термодинамического цикла

легководных АЭС является весьма эффективным с экономической и термодинамических точек зрения.

Библиографический список

1. Щеклеин С. Е. Повышение энергоэффективности АЭС / С. Е. Щеклеин, О. Л. Ташлыков, А. М. Дубинин // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2015. – № 4. – С. 15–25.
2. Тепловые схемы ТЭС и АЭС / В. М. Боровков, О. И. Демидов, С. А. Казаров [и др.] ; под ред. С. А. Казарова. – Санкт-Петербург : Энергоатомиздат, 1995. – 392 с. – ISBN 5-283-04708-3.
3. United Cycle. Руководство пользователя. – URL: nil-teplo.ru/unitedcycle/ (дата обращения: 17.03.2021).
4. Калафти Д. Д. Термодинамические циклы атомных электростанций / Д. Д. Калафати. – Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1963. – 280 с.
5. Щепетина Т. Д. О повышении КПД энергоблоков с водо водяными реакторами (ВВР) / Т. Д. Щепетина // Энергия: экономика, техника, экология. – 2010 – № 12 – С. 21–29.
6. A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems. Issued by the US DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum, December 2002 // GEN IV International Forum. – 2021. – URL: https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_40473/a-technology-roadmap-for-generation-iv-nuclear-energy-systems (accessed: 17.03.2021).

УДК 621.311.22

Масленников Г.Е., Симанов Н.А., Рыжков А.Ф.

ПГУ-ТЭЦ С ПОНИЖЕННЫМ УГЛЕРОДНЫМ СЛЕДОМ

Аннотация. В статье рассматривается создание энергоэффективных и экологически чистых ресурсосберегающих технологий производства энергии на основе ископаемых видов топлива, твердых отходов и материалов. В качестве объекта исследования мы выбрали установку ПГУ природного газа с установкой карбонизации золы твердых бытовых отходов. Прототипом установки ПГУ является ПГУ «Академическая» установленной мощностью 230 МВт. Прямой полусухой метод используется для карбонизации золы ТКО. Определяются мощность и КПД цикла, а также параметры дымового газа, которые передаются для расчета карбонизации. В результате расчетов было установлено, что удельный выброс CO2 от электростанции, использующей карбонизацию, может быть снижен почти на 20%. Однако требуется большое количество ТКО (2,6-6,7 кг/кг дымовых газов), что вызывает определенные трудности при реализации проекта.

Ключевые слова: карбонизация, ПГУ, зола ТКО.

Abstract. The article deals with the creation of creating energy-efficient and environmentally friendly resource-saving energy generation technologies based on fossil fuels, solid waste, and materials. We selected a natural gas CCGT unit with a municipal solid waste ash carbonation unit an object of research. The prototype of the CCGT unit is the CCGT «Akademicheskaya» with an installed capacity of 230 MW. The direct semi-dry method is used for the carbonation of MSW ash. The power and efficiency of the cycle are determined, as well as the parameters of the flue gas, which are transferred to the calculation of carbonation. As a result of calculations, it was found that this specific CO_2 emission from the power plant using carbonation can be reduced by almost 20%. However, an extensive amount of MSW is required (2.6-6.7 kg/kg of flue gases) and that causes certain difficulties for implementing the project.

Keywords: carbonation, CCGT, MSW ash.

Введение

Проблемы ужесточения норм выбросов вредных веществ и принятые обязательства по сокращению эмиссии парниковых газов требуют разработки экологически и экономически состоятельных технологий улавливания CO2 и его последующей утилизации [1, 2]. Согласно глобальным экологическим программам сценарий снижения выбросов CO2 неизбежно будет реализовываться для всех отраслей производства, однако лишь энергетической отрасли требуется переходить в 2050-2060 г.г. к безэмиссионным низкоуглеродным технологиям с сокращением выбросов CO2 на 80-95 % по отношению к 1990 г, а выбросов других вредных веществ на 100% [3].

Одним из вариантов решения данной проблемы предлагается метод CCS (Carbon Capture and Storage – улавливание и хранение углерода) [4], включающий выделение CO_2 из дымовых газов промышленных и энергетических источников, его транспортировку к месту хранения и долгосрочную изоляцию от атмосферы. Более перспективным методом является минерализация CO_2 путем карбонизации материалов с повышенным содержанием основных оксидов: горные породы, золошлаковые отходы (ЗШО), отходы строительной индустрии и др. Впервые мысль о карбонизации минералов для секвестрации CO2 в стабильной твердой фазе была высказана в 1990 году в работе [5].

По данным International Energy Agency (IEA) комплексный подход к проблеме минерализации CO2 за счет карбонизации золошлаковых отходов ТЭС является одним из наиболее перспективных в решении глобальных экологических проблем энергетики развитых и развивающихся экономик (Китай, США, Канада, Австралия, Россия). В России решение проблемы находится на стадии аналитических и экспериментальных исследований.

В настоящее время наиболее эффективным признан одностадийный процесс карбонизации ex-situ твердых искусственных материалов с улавливанием CO2, получивший название прямой ускоренной карбонизации (direct accelerated mineral carbonation – AMC) [6, 7]. Основной проблемой прямой ускоренной карбонизации является необходимость интенсификации реакций и рационального использования тепловыделений (тепловых эффектов) при их протекании [8]. Чтобы приступить к решению этой проблемы, нужно рассмотреть технологические варианты реализации химической задачи. В обзоре [4] процесс ускоренной прямой карбонизации рассматривают в трех вариантах: (1) L/S=0 – сухой процесс; (2) L/S=0,03-1 – полусухой процесс; (3) (1) L/S>0 – суспензионный процесс.

Прямой метод означает, что CO2 подается в сухой или увлажненный химически необработанный щелочной отход, например, зольную пыль или водную суспензию летучей золы. В этом процессе катионы из летучей золы, такие как Ca2+ и Mg2+ выщелачиваются в раствор и затем осаждаются в виде карбонатов на поверхности твердых частиц. Продукты прямой карбонизации подходят, например, для использования в качестве добавок к цементу.

Исследования минеральной карбонизации CO2 с использованием золы-уноса сосредоточены в основном на прямом водном маршруте, который включает прямую реакцию летучей золы с CO2 в одном реакторе с водой в качестве реакционной среды. В водных системах летучая зола реагирует с CO2 в 3 этапа, это показано в уравнениях 1 – 4 [9, 4]. На первом этапе происходит растворение извести (CaO), высвобождаются катионы в раствор, и pH раствора повышается.

Это облегчает начало второй стадии, в которой поглощение CO2 максимизируется осаждением CaCO3, что благоприятно при высоких значениях pH. Поскольку Ca расходуется на осаждение CaCO3, в системе накапливается неорганический CO2, что приводит к снижению pH, ингибированию осаждения CaCO3 и снижению концентрации CO2. Наконец, когда pH становится достаточно низким, начинается растворение периклаза (MgO) с последующим образованием растворенного бикарбоната магния. [4]

Растворение извести:

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca^{2+} + 2OH^- \quad (1)$$

Самопроизвольная карбонизация гидроксида кальция в суспензии:

$$Ca^{2+} + 2OH^- + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \quad (2)$$

Растворение периклаза и образование $Mg(HCO_3)_2$:

$$MgO + H_2O \rightarrow Mg^{2+} + 2OH^- \quad (3)$$

$$Mg^{2+} + 2OH^- + 2CO_2 \rightarrow Mg^{2+} + 2HCO_3^- \quad (4)$$

Прямая карбонизация также может быть осуществлена полусухим способом. Низкое содержание воды облегчает сушку продукта. Этот полусухой технологический маршрут также позволяет контролировать размер зерна и химический состав производимого карбонизированного материала, что поможет найти применение для этих материалов, например, в строительной промышленности. Третий вариант прямой карбонизации – это сухой путь. Dananjayan сравнил сухой и водный пути прямой карбонизации и показал, что сухой является более медленным процессом, чем способ влажной карбонизации в воде. [4].

В настоящей работе рассмотрены вопросы создания энергоэффективных и экологически чистых ресурсосберегающих технологий энергогенерации на базе органического топлива, твёрдых отходов и материалов. В качестве объекта исследования выбрана ПГУ на природном газе с установкой карбонизации золы ТКО. Прототипом ПГУ служит ПГУ-ТЭЦ «Академическая» установленной мощностью 230 МВт. Для карбонизации золы ТКО используется прямой полусухой маршрут, описанный в [7].

В расчете ПГУ определяются мощность и КПД цикла, а также параметры дымового газа, которые передаются в расчет карбонизации. Целью расчета установки карбонизации является оценка объемов потребления золы ТКО и влияние на эффективность всей энергоустановки.

Используемые расчетные методы

Современные цифровые технологии предоставляют широкий спектр пакетов программ, позволяющих существенно сократить время и повысить точность математических расчётов. В настоящее время существует большое количество широко распространенного коммерческого программного обеспечения, например, «Aspen Plus», который повсеместно используется для моделирования химических и термодинамических процессов. Среди открытого программного обеспечения альтернативой выступают продукты «COCO Simulator» и «DWSIM». Программы позволяют выполнять стационарные термодинамические расчеты технологических схем, определять фазовые равновесия многокомпонентных сред, проводить моделирование химических процессов. Исходя из собственного опыта работы в данных программах, можно сказать, что «DWSIM» имеет лучше настроенный решатель, справляющийся со сложными схемами с большим количеством циклических потоков. Преимуществом же «COCO Simulator» является широкий функционал по заданию новых веществ, отсутствующих в стандартной библиотеке. Однако данные продукты всё же уступают «Aspen Plus» в объеме баз веществ, термодинамических моделей и функциональных элементов.

Для расчета тепловой схемы ПГУ был выбран пакет «DWSIM», а для расчета узла карбонизации – «COCO Simulator». Для определения термодинамических свойств потока воды/пара используется пакет свойств, основанный на формуляции IAPWS-IF97. Газовые потоки (воздух, топливо, продукты сгорания) рассматривается как реальная газы, и их энтальпия, энтропия и теплоемкости рассчитываться с использованием уравнений состояния реального газа Peng–Robinson [11].

Расчет ПГУ

За прототип расчетной схемы взята тепловая схема энергоблока ПГУ-230 ТЭЦ «Академической». В состав ПГУ входит: одна ГТУ типа GT13E2 с номинальной электрической мощностью (по условиям ISO) 166,6 МВт и КПД 36,5%, паровой котёл-утилизатор ПК-86, одна паровая турбина типа КТ-63-7,0. Первые три ступени ГТУ имеют воздушное охлаждение, которое необходимо учитывать для более корректного расчета температуры выхлопных газов (рис. 1).

Подробные данные по этой системе закрыты производителем, поэтому приближенные расходы были взяты по работе [12], так 7% от расхода воздуха на входе в компрессор идет на охлаждение турбины, из этого количества 72,4% приходится на охлаждение 1 ступени (подается в элемент камеры сгорания), 19,7% и 7,9% – на 2 и 3 ступени соответственно. Деаэратор питается паром отбора из барабана НД.

Расчёт выполняются при параметрах наружного воздуха: температура 15°С, давление 1,013 бар, влажность 60%, и номинальном режиме работы оборудования ПГУ. Предполагается, что паровая турбина работает в конденсационном режиме. Прочие исходные данные для расчета ПГУ представлены в таблице 1.

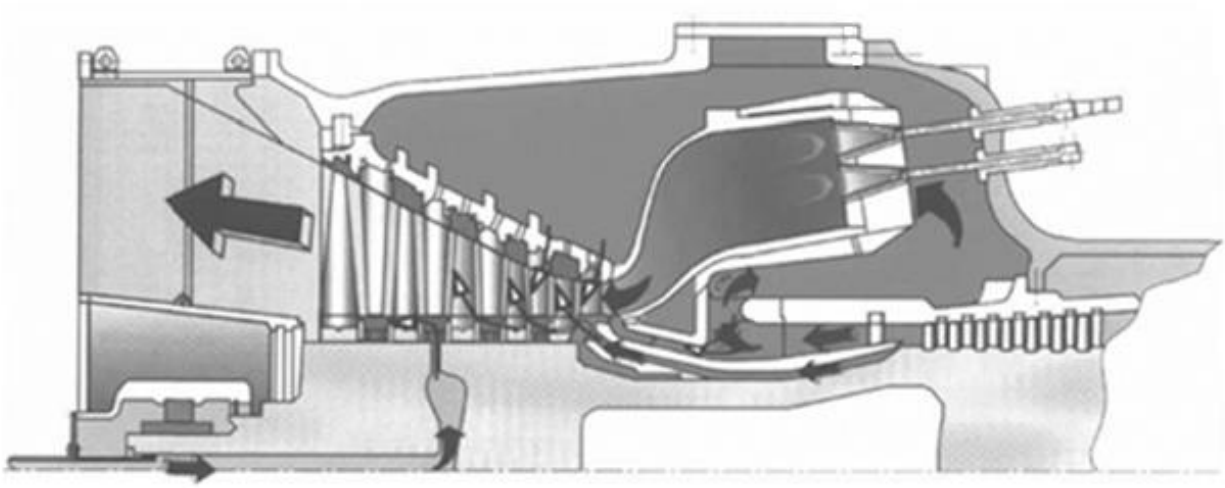


Рисунок 1 – Продольный разрез ГТУ GT13E2

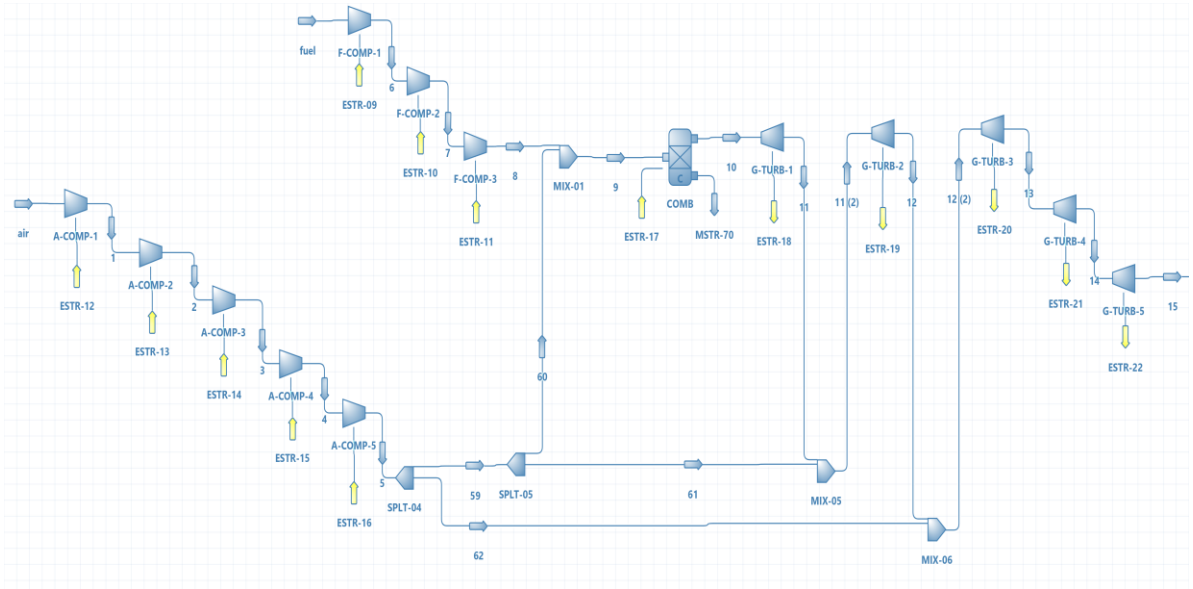


Рисунок 2а – Расчетная схема ГТУ

Таблица 1 – Основные допущения для расчетов ПГУ

Параметр	Размерность	Значение
Состав топлива: CH_4, C_2H_6, C_3H_8, N_2	%	97.69, 0.82, 0.33, 1.16
Степень сжатия воздушного/топливного компрессора		16.9/3.9
Изоэнтропийный КПД компрессоров	%	92.0/84.0
Температура на входе в турбину	°C	1095
Расход газов за ГТУ	кг/с	547.6
Потери теплоты в КС	% от LHV топлива	0.9
Гидравлические потери КС	%	3
Механический КПД турбины/компрессоров	%	99.8
Потери давления в газовом тракте КУ	кПа	3
Температура свежего пара (ВД/НД)	°C	483.6/276.7
Давление пара на выходе (ВД/НД)	бар	79.8/11.9
Давление в деаэраторе	бар	6
Давление в конденсаторе	кПа	5
Температура конденсата перед ГПК	°C	60
Тепловые потери от наружного охлаждения КУ	%	0.7
Пинч ВД/НД	°C	10
Недогрев конденсата до температуры насыщения в деаэраторе	°C	7
Недогрев питательной воды до температуры насыщения в барабане	°C	5
Гидравлическое сопротивление ППВД/ППНД/ в паропроводах свежего пара/в стопорных клапанах	%	5/5/8.5/3
Изоэнтропийный КПД ЧВД/ЧНД/насосов	%	83.0/78.0/75.0
Механический КПД турбины/компрессоров	%	99.5
КПД электрогенератора	%	98.7
Тепловая мощность ВВТО	Гкал/ч	22.9
Температурный график	°C	70/40
Расход сетевой воды	кг/с	1027.8

Вид построенной схемы показан на рис. 2а и 2б

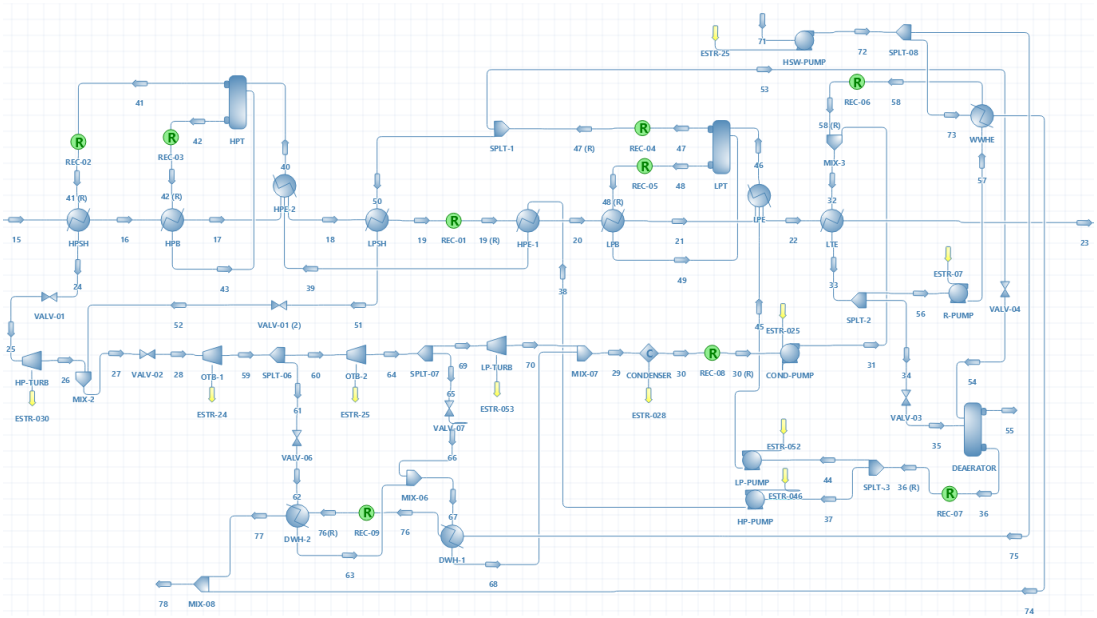


Рисунок 2б – Расчетная схема КУ и ПТ

Для верификации расчета используются данные по работе энергоблока ПГУ ТЭЦ «Академической», верификационные данные и данные, полученные в расчете, представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Показатели работы энергоблока ПГУ

Параметр	Размерность	Расчетное значение	Знач. для верифика-ции	Относит. отклоне-ние, %
Температура газов за ГТУ	°С	505.8	507.8	0.39
Состав продуктов сгорания:	%			
N_2		75,0	75,0	0.00
O_2		14.15	14.06	0.64
H_2O		6.93	6.98	0.72
CO_2		3.02	3.07	1.63
Ar		0.89	0.89	0.00
Паропроизводительность ВД	кг/с	58.22	59.64	2.38
Паропроизводительность НД	кг/с	13.4	13.06	2.60
Температура уходящих газов за КУ	°С	91.3	91.9	0.65
Мощность ГТУ брутто	МВт	163.84	166.6	1.64
Электрическая мощность ПТ брутто	МВт	58.92	–	–
Электрическая мощность топливного компрессора	МВт	-2.39	–	–
Электрическая мощность насосов	МВт	-1.67	–	–
Электрическая мощность ПГУ (брутто)	МВт	222.76	–	–

Электрическая мощность ПГУ (нетто)	МВт	218.70	–	–
Тепловая мощность	МВт	130.91	–	–
Подведенная в цикл теплота	МВт	455.82	–	–
КПД ГТУ (брутто)	%	35.94	–	–
КПД КУ	%	72.65	–	–
КПД ПТ (брутто)	%	23.74	–	–
КПД ПГУ (брутто)	%	48.87	–	–
КПД ПГУ (нетто)	%	47.98	–	–
Коэффициент использования топлива	%	76.70	–	–
Удельные выбросы CO2	г/кВтч	420.9	–	–

Как видно, относительные отклонения расчетных значений от верифицируемых составляют менее 4%. Таким образом, можно считать расчетную модель тепловой схемы ПГУ-230 завершенной и удовлетворительной. На следующем этапе параметры газа за КУ будут использоваться в расчете карбонизации золы ТКО.

Расчет карбонизации

В качестве расчетной схемы выбран процесс АМС, предложенный в [7] и включающий следующие элементы: осушитель (MRD), дутьевой вентилятор, увлажнитель, нагреватель и реактор с кипящем слоем (FBR) (рис.3). Дымовой газ отводится из дымовой трубы и подается в MRD. В MRD улавливается сконденсированная влага для защиты дутьевого вентилятора. Увлажнитель и нагреватель позволяют контролировать влажность и температуру дымовых газов.

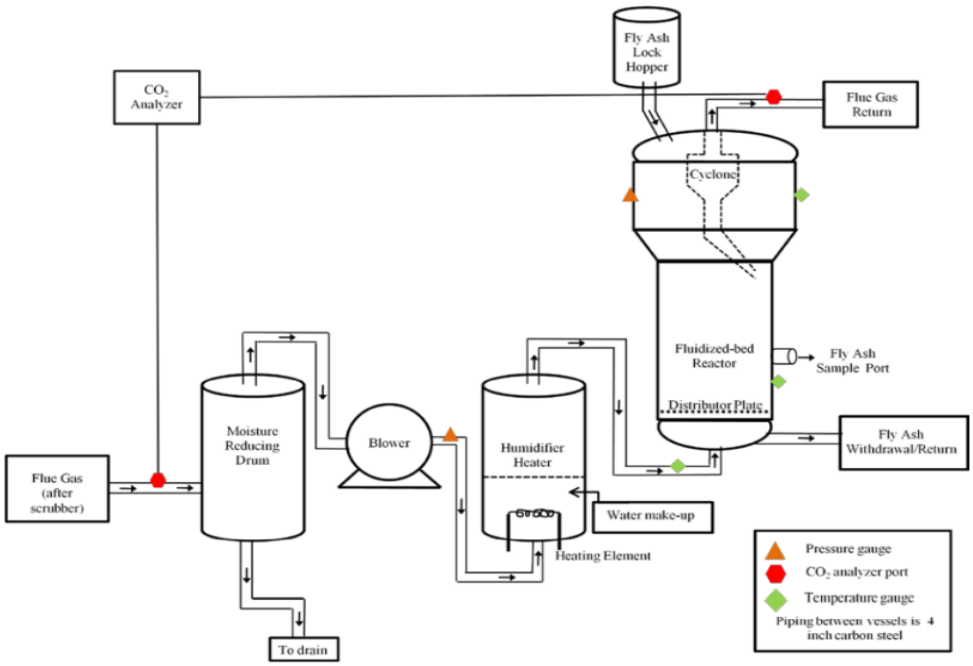


Рисунок 3 – Схема процесса АМС для прямого улавливания и минерализации CO_2 из дымовых газов

Верхний вход реактора соединен с бункером золы для подачи необходимого количества свежего материала в реактор. Частицы летучей золы псевдоожижаются потоком дымового газа, тем самым обеспечивается надлежащее перемешивание и хороший контакт между частицами и газом.

Расчет карбонизации выполняется в программном комплексе «COCO Simulator». Расчетная схема процесса карбонизации золы, составленная в соответствии со схемой испытанной пилотной установки [7], представлена на рис. 4.

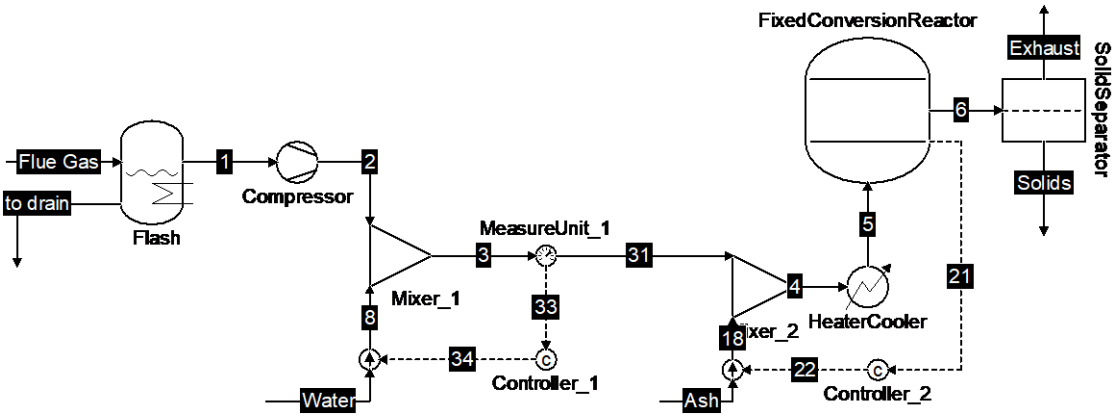


Рисунок 4 – Смоделированная в «COCO Simulator» схема процесса АМС для прямого улавливания и минерализации CO_2 из дымовых газов

По условиям [7], дымовой газ состоит из CO_2 – 13%, H_2O – 10%, N_2 – 66%, O_2 – 11%, его расход составляет 10,38 кг/мин. Состав свежей золы представлен в табл. 1. Давление в реакторе равняется 115,1 кПа. Изоэнтропийный КПД компрессора 75,0%. Перед подачей в реактор газ увлажняется до содержания воды 16%. Температура газа перед реактором составляет 60 ^{0}С.

Таблица 3 – Элементный состав (в пересчете на оксиды) свежей золы для верификации, % (по массе) [7]

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	$CaCO_3$	Water
58.61	19.06	5.37	7.5	3.85	0.7	0.94	<0.1	0.042

В расчете рассматриваются следующие четыре реакции взаимодействия CO_2 с оксидами металлов:

– $CaO+CO_2=CaCO_3$;
– $MgO+CO_2=MgCO_3$;
– $K_2O+CO_2=K_2CO_3$;
– $Na_2O+CO_2=Na_2CO_3$;

Автор не приводит значение эффективности карбонизации, поэтому полнота протекания реакций была принята 30% как для полу-сухого процесса в [10].

Верификация производится по концентрации CO_2 в газах после реактора и по содержанию $CaCO_3$ – в карбонизированной золе. Результаты верификации расчета по данным [7] представлены в табл. 4, они говорят об адекватности модели.

Таблица 4 – Верификация расчетной схемы АМС

Дымовые газы (мол. %)				Зола (масс. %)			
Состав	До карбониза-ции [7]	После карбонизации		Состав	До карбониза-ции [7]	После карбонизации	
		[7]	Расчет			[7]	Расчет
CO_2	13	9.6	9.6	$CaCO_3$	0.10	3.5-4	3.98

Результаты расчета показывают, что степень конверсии CO_2 составляет 22,6 %, при этом улавливается 0,033 $кг_{CO2}/кг_{золы}$.

Собственный расчет карбонизации золы ТКО производится для двух составов зол, состав которых взят из работы [13]. В данной работе исследовались твердые остатки, которые образуются при термической переработке ТКО по двум наиболее распространенным технологиям сжигания – на механических колосниковых решетках (КР) и в топках с вихревым кипящим слоем (ВКС). Состав этих зол приведен в табл. 5.

Параметры карбонизации, полученные на этапе верификации и закладываемые в основной расчет, следующие: степень конверсии карбонизируемых оксидов – 30%, степень конверсии CO2 – 22,6 %. Дымовой газ ПГУ состоит из CO_2 – 3,02%, H_2O – 6,93%, N_2 – 75,0%, O_2 – 14,14%, его расход составляет 547,6 кг/с. Результаты расчетов для двух зол представлены в табл. 6.

Таблица 5 – Элементный состав (в пересчете на оксиды) твердых остатков мусоросжигательных заводов, сжигающих ТКО, % (по массе) [13]

Оксид	Зола-уноса КР				Зола-уноса ВКС			
	мин	макс	сред	прин. в расчете	мин	макс	сред	прин. в расчете
SiO_2	29	43.2	36.1	45.1	54.9	77	65.95	68.15
TiO_2	0.9	2.6	1.75	0	0.6	0.8	0.7	0
$A1_2O_3$	7.2	13.6	10.4	10.4	4.5	11.1	7.8	7.8
Fe_2O_3	1.5	5.9	3.7	3.7	0.7	2.4	1.55	1.55
CaO	13.8	37	25.4	25.4	10.8	19	14.9	14.9
MgO	1.5	2.5	2	2	0.5	1.3	0.9	0.9
K_2O	0.5	4.5	2.5	2.5	0.9	1.4	1.15	1.15
Na_2O	2.2	6.5	4.35	4.35	1.3	2.1	1.7	1.7
SO_3	4.5	8.6	6.55	6.55	1.2	6.5	3.85	3.85
P_2O_5	2.1	6.5	4.3	0	0.5	2.1	1.3	0
Cl	0.8	2.7	1.75	0	0.3	1.4	0.85	0

Таблица 6 – Результаты расчета карбонизации зол ТКО

Параметр	Размерность	Зола КР	Зола ВКС
Расход золы	кг/с	73.0	133.6
Удельный расход золы	кг/(кг газа)	0.133	0.207
Удельный выход золы уноса [13]	кг/кг(ТКО)	0.02	0.08
Количество потребляемого ТКО	кг/(кг газа)	6.65	2.59
Концентрация CO2 в выхлопном газе	% (по об.)	2.11	
Концентрация карбонатов в готовой золе	% (по мас.)		
$CaCO_3$		9.21	7.94
$MgCO_3$		1.01	0.56
K_2CO_3		0.54	0.50
Na_2CO_3		1.43	0.87
Затраты на сжатие дымовых газов	MW	10.04	

В результате расчета получаем, что для улавливания 22,6 % CO2 из дымовых газов ПГУ на природном газе потребуется 0,1-0,2 кг золы ТКО на кг дымовых газов. Затраты энергии на нагнетание дымовых газов в установку карбонизации снижают КПД нетто энергоблока с 50,02% до 47,81%. При этом удельные выбросы CO2 всей энергоустановкой снизятся почти на 20% с 420 до 340 г/кВтч. Однако в данной работе еще не продумана система увлажнения и подогрева дымового газа в установке, поэтому тепловые затраты узла карбонизации не оцениваются.

Заключение

В статье рассматриваются вопросы создания энергоэффективных и экологически чистых ресурсосберегающих технологий производства энергии на основе ископаемых видов топлива, твердых отходов и материалов. Стабилизация золоотходов, достигаемая в процессе карбонизации, позволяет использовать их в строительной промышленности вместо природных минералов. Проведено моделирование схемы установки ПГУ природного газа с установкой карбонизации золы ТКО. Прототипом установки ПГУ является ПГУ «Академическая» установленной мощностью 230 МВт. Для карбонизации используется прямой полусухой путь, описанный в [7].

Расчет ПГУ проводился в открытом программном обеспечении для моделирования химических процессов «DWSIM». Относительные отклонения расчетных значений от заявленных составляют менее 4%. Расчет процесса карбонизации золы ТКО двух составов (содержание CaO составляет 25,4–14,9% мас.) проводился в бесплатном программном пакете «COCO Simulator». Параметры карбонизации, полученные на этапе проверки и включенные в основной расчет, следующие: степень конверсии карбонизированных оксидов составляет 30%, степень конверсии CO2 составляет 22,6%.

В результате расчета мы обнаружили, что для улавливания заданного количества CO2 из дымовых газов ПГУ, сжигаемого с использованием природного газа, потребуется 0,1-0,2 кг золы ТКО на кг дымовых газов. Потребление энергии для впрыска дымовых газов в установку карбонизации снижает чистый КПД энергоблока на 2,2% в абсолютном выражении. В то же время удельные выбросы CO2 всей электростанции снизятся почти на 20% с 420 до 340 г/кВт · ч. Однако в данной работе система увлажнения и нагрева дымовых газов в установке еще не продумана, поэтому тепловые затраты на установку карбонизации не оцениваются. Большое количество необходимых ТКО (2,6-6,7 кг/кг дымовых газов) вызывает определенные трудности при реализации проекта.

Библиографический список

1. Putting CO2 to Use [site]. – Paris : IEA, 2019. – URL: https://www.iea.org/reports/putting-co2-to-use (accessed: 12.05.2021).
2. Iizuka Ho. H-J. Carbon capture and utilization technology without carbon-dioxide purification and pressurization: a review on its necessity and available technologies / Ho. H-J. Iizuka, E. Shibata. – DOI 10.1021/ACS.IECR.9B01213 // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2019. – Vol. 58, Iss. 21. – P. 8941–8954.
3. Roadmap 2050. – Brussels : European Comission, 2011. – URL: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/roadmap2050_ia_20120430_en_0.pdf (accessed: 12.10.2020).
4. Applications of fly ash for CO_2 capture, utilization, and storage / A. Dindi, D. V. Quang, L. F. Vega [et al.]. – DOI 10.1016/J.JCOU.2018.11.011 // Journal of CO_2 Utilization. – 2016. – Vol. 29. – P. 82–102.
5. Seifritz W. CO_2 disposal by means of silicates / W. Seifritz // Nature. – 1990. – Vol. 345, Iss. 6275. – P. 486–486.
6. A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO_2 / M. Fernández Bertos, S. J. Simons, C. D. Hills and P. J. Carey // Journal of Hazardous Materials. – 2004. – Vol. 112, Iss. 3. – P. 193–205.
7. Instantaneous capture and mineralization of flue gas carbon dioxide: pilot scale study / K. J. Reddy, H. Weber, P. Bhattacharyya [et al.]. – DOI 10.1038/NPRE.2010.5404.1// Nature Precedings. – 2010. – Vol. 5. – P. 17–19.
8. Chiang P. C. Carbon Dioxide Mineralization and Utilization / P. C. Chiang, S.-Y. Pan. – [S. l.] : Springer–Singapore, 2017. – 456 p. – DOI 10.1007/978-981-10-3268-4. – ISBN 978-981-10-9830-7.
9. Reactivity of alkaline lignite fly ashes towards CO_2 in water / M. Back, M. Kuehn, H. Stanjek, S. Peiffer // Environmental Science & Technology. – 2008. – Vol. 42. – P. 4520–4526.
10. Dananjayan R. R. T. Direct mineral carbonation of coal fly ash for CO_2 sequestration / R. R. T. Dananjayan, P. Kandasamy, R. Andimuthu. – DOI

10.1016/J.JCLEPRO.2015.05.145 // Journal of Cleaner Production. – 2016. – Vol. 112. – P. 4173–4182.
11. Peng D. Y. A new two-constant equation of state / D. Y. Peng, D. B. Robinson. – DOI 10.1021/I160057A011 // Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals. – 1976. – Vol. 15. – P. 59–64.
12. Chiesa P. A thermodynamic analysis of different options to break 60% electric efficiency in combined cycle power plants / P. Chiesa, E. Macchi. – DOI 10.1115/1.1771684 // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-transactions of The Asme. – 2004. – Vol. 126, Iss. 4. – P. 770–785.
13. Tugov A. N. Prospects for the use of municipal solid wastes as secondary energy resources in Russia / A. N. Tugov. – DOI 10.1134/S0040601513090139 // Thermal Engineering. – 2013. – Vol. 60, Iss. 9. – P. 663–668.

УДК 621.039:004.6

Аристов Н. М., Васютин Н. А., Литовченко В. Ю., Ташлыков О. Л.

ОБЛУЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ С ЛИТИЙСОДЕРЖАЩИМИ КЕРАМИКАМИ И БЕРИЛЛИЙСОДЕРЖАЩИМИ СПЛАВАМИ В РЕАКТОРЕ ИВВ-2М ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КИНЕТИКИ ВЫХОДА ТРИТИЯ

Аннотация. В работе рассматривается возможность проведения в активной зоне реактора ИВВ-2М облучения функциональных материалов, предполагается использовать в качестве кандидатов для бланкета термоядерного реактора ИТЭР. Изложены данные нейтронно-физических, а также теплофизических расчетов, подтверждающих возможность проведения облучения, показаны разработанные ампулы для проведения облучения.

Ключевые слова: ИВВ-2М, ИТЭР, бланкет, облучение, тритий.

Abstract. The paper considers the possibility of irradiation of functional materials in IVV-2M reactor core that intended to be used as candidates for the blanket of ITER thermonuclear reactor. There are neutronic and thermophysical data provided that confirms the possibility of irradiation, and ampules, designed for irradiation are provided.

Keywords: IVV-2M, ITER, blanket, irradiation, tritium.

Введение

В настоящее время среди перспективных энергетических технологий рассматривается термоядерный синтез. Термоядерные реакции протекают на легких ядрах, при этом в ходе таких реакций выделяется большое количество энергии. Проблема осуществления контролируемого ядерного синтеза заключается в том, что реакции протекают при высоких температурах (108 °С и выше). Для осуществления контролируемого ядерного синтеза одной из перспективных считается реакция слияния ядер дейтерия и трития:

$$ {}^{2}_{1}D + {}^{3}_{1}T \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n(14.1MeV) + 17.6MeV \quad (1) $$

В термоядерном реакторе необходимо соблюсти условия, при которых плазма, обладающая высокой температурой, удерживается таким образом, чтобы, во-первых, затраты на ее удержание не превышали полезный выход реакции, а во-вторых, чтобы имелась возможность использовать энергию, выделившуюся в ходе реакции. Для утилизации энергии используется специальная оболочка вокруг плазмы – бланкет (blanket) [1,2]. Материал бланкета должен иметь небольшую толщину, в случае если плазма удерживается электромагнитным способом, чтобы снизить затраты на ее удержание, а также эффективно преобразовывать энергию

налетающих нейтронов в тепло. В дополнение, для длительного поддержания реакции синтеза необходимо восполнять запасы трития.

Таким образом, для материалов бланкета выдвигаются следующие требования:

– необходимо, чтобы материал был способен выделять тритий в достаточном количестве для поддержания термоядерной реакции;
– необходимо, чтобы материал был способен утилизировать энергию налетающих быстрых нейтронов.

Для первой категории материалов кандидатами считаются литийсодержащие керамики (размножители – Ceramic breeders). Изотоп Li-6 может в ходе реакции

$$ {}^{6}_{3}Li + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{4}_{2}He + T \qquad (2) $$

выделять значительное количество трития. В данной работе в качестве рассматриваемых материалов выступают керамики метатитанат лития, ортисиликат лития, цирконат лития: Li_2TiO_3, Li_4SiO_4, Li_2ZrO_3 (керамики для простоты названы LMT, LOS и LTZO, последняя является смесью титаната и цирконата лития). В бланкете они используются в виде сферических гранул диаметром 1 мм. Обогащение лития в керамиках по Li-6 может достигать 95%.

Для второй категории материалов можно использовать сплавы на основе бериллия (материалы-умножители нейтронов – neutron multipliers). Be-9 является размножителем нейтронов, поскольку в термоядерном реакторе возможно использовать реакцию:

$$ {}^{9}_{4}Be + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{4}_{2}He + 2{}^{1}_{0}n \qquad (3) $$

Полученные таким образом нейтроны можно использовать для воспроизводства трития. В данной работе рассматривался чистый бериллий, а также некоторые интерметаллиды на его основе: бериллиды ванадия, титана, хрома – Be, $Be_{12}V$, $Be_{12}Ti$, $Be_{12}V_{0.9}Ti_{0.1}$, $Be_{12}Cr$.

Имеется возможность также использовать материалы, содержащие лантан $LaPb_3$, поскольку он также способен к размножению нейтронов за счет протекания реакций $(n, 2n)$, $(n, 3n)$, $(n, 4n)$.

Материалы бланкета испытывают большие радиационные повреждения, обусловленные действием на них быстрых нейтронов [3]. При этом, на 10% выгорания Li−6 в керамике, повреждающая доза может достигать 20 – 25 СНА. Под действием нейтронного облучения происходит распухание материала, а внутри

шариков возникают механические сжимающие напряжения, способные разрушить материал. Вдобавок, при выделении трития в шариках образуются поры, которые при облучении увеличиваются [4].

Целью работы стало изучение влияния нейтронного облучения при различных температурах на механические свойства материалов, а также на кинетику выхода трития из литийсодержащих керамик.

Постановка задач

Работа разделе на две задачи: первая заключается в исследовании выхода трития при облучении рассматриваемых материалов, вторая – к организации облучения с последующим проведением послереакторных исследований.

В первой задаче рассматривались литийсодержащие керамики – смесь метатитаната и ортисиликата лития в пропорции 30 мол.% Li_2TiO_3 + 70 мол.% Li_4SiO_4 с обогащением 90% по изотопу Li-6. Рассматривалось облучение образцов в виде шариковой засыпки с диаметром шариков 1 мм. Облучение необходимо производить в инертной среде (He–0,1% H_2), поскольку при контакте с воздухом, под действием паров воды, содержащихся в воздухе происходит быстрая деградация материала. В условиях высокой температуры облучения, данный процесс приведет к разрушению образцов. При облучении необходимо обеспечить продувку облучаемого материала, чтобы иметь возможность уводить нарабатываемый тритий из активной зоны реактора и доставлять его на измерительную часть экспериментального стенда. Температура образцов при облучении должна изменяться от 400 до 900 °C с шагом в 100-150 градусов. Также, необходимо выдержать ступенчатый режим изменения температуры, например, зафиксировать температуру 550 °C до установления стационарного выхода трития, а затем поднять температуру до 900 °C и также выдержать время, чтобы интенсифицировать выход трития за пределы образцов за счет диффузии пор к поверхности.

Во второй задаче рассматриваемые образцы поделены на две группы: образцы нейтронного умножителя – neutron multipliers (NM), а также образцы тритиевого размножителя _ ceramic breeders (CB).

Образцы NM – бериллийсодержащие сплавы в форме дисков (пеллетов), в форме шариковой засыпки (пебблы), а также в форме полнотелых цилиндров размещаются в многоярусных ампулах внутри раздельных пеналов. Пример размещения материалов внутри ампул приведен на рисунке 1. Все образцы также необходимо облучать при высокой температуре, однако в данном эксперименте температура на образцах постоянна. В данном случае, исследуется радиационная повреждаемость образцов при высоких температурах. Диапазон температур

облучения выбран от 350 до 900 °С с шагом 150 градусов. Рассматривалась также возможность достижения высокотемпературных режимов облучения для образцов $LaPb_3$.

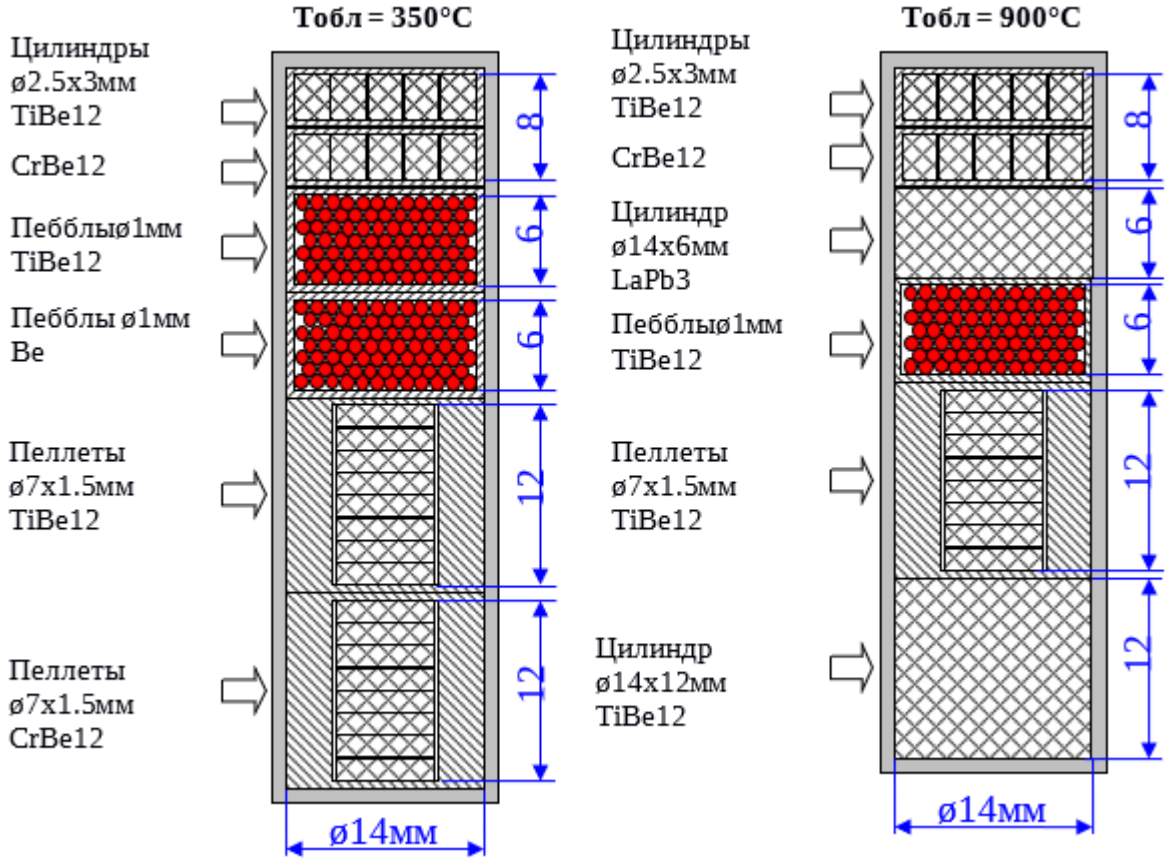


Рисунок 1 – Пример компоновки ампул с бериллийсодержащими образцами

Образцы СВ _ литийсодержащие керамики, чистые метатитанат и ортосиликат лития в форме дисковых образцов, либо же их смеси в форме шариковых засыпок. Рассматривалось два варианта обогащения образцов по изотопу Li-6 – 90% и 60%. Меньшее обогащение рассматривалось по причине высокого удельного на грамм энерговыделения, при котором не удавалось при расчетах получить низкотемпературные режимы облучения. Данные образцы облучаются в отдельных ампулах и при меньшей массе самого образца (не более 2 грамм на ампулу), данная мера принята для возможности регулирования диапазона температур на образцах не только вверх, но и вниз за счет варьирования смеси продувочного газа.

Обязательным условием облучения является набор повреждающей дозы на облучаемых образцах не менее 3 СНА за период облучения. Поскольку энергетический спектр реактора ИВВ-2М отличается от спектра реактора ИТЭР, имеет значение увеличение соотношения накапливаемой повреждающей дозы в

образцах к их выгоранию. Период облучения ограничен 1 календарным годом, ввиду особенностей проведения эксперимента, поэтому при рассмотрении ячеек для размещения облучаемых материалов с образцами следует учесть особенности накопления повреждающей дозы в активной зоне реактора, а также рассмотреть возможность использования защитных экранов, которые отрежут низкоэнергетическую составляющую спектра нейтронов, тем самым снизив выгорание материалов (в особенности это касается литийсодержащих керамик).

Для подтверждения возможности проведения облучения образцов необходимо провести расчеты нейтронно-физических и теплофизических характеристик. При проведении расчетов необходимо получить следующие характеристики эксперимента:

- скорость реакции образования трития для литийсодержащих образцов для оценки наработки трития за период облучения;
- накопление повреждающей дозы образцами, а также скорость реакции выгорания образцов для оценки соотношения повреждающей дозы и выгорания материала;
- энерговыделение в образцах, для того, чтобы провести теплофизический расчет и получить распределение температуры в образцах;
- температурное распределение в образцах для оценки выполнимости соблюдения заданных температурных режимов.

Расчеты нейтронно-физических характеристик эксперимента проведены в расчетном коде, использующем метод Монте-Карло. Теплофизические параметры получены с использованием расчетной программы ANSYS (Fluent).

Условия проведения эксперимента

Активная зона ИЯР ИВВ-2М состоит из ТВС, бериллиевых блоков, выступающих в качестве отражателя, а также экспериментальных устройств, используемых для решения научно-исследовательских и производственных задач. Зона поделена на секции: имеется центральная секция, а также 6 секций, примыкающих к ней (рисунок 2). Конструктивные решения и блочная структура активной зоны и отражателя, однотипность и взаимозаменяемость элементов активной зоны позволяет создавать различные компоновки активной зоны, изменять количество секций, их размеры и размещение в опорной решётке, а также варьировать размерами экспериментальных устройств и их нейтронно-физическими и теплотехническими характеристиками.

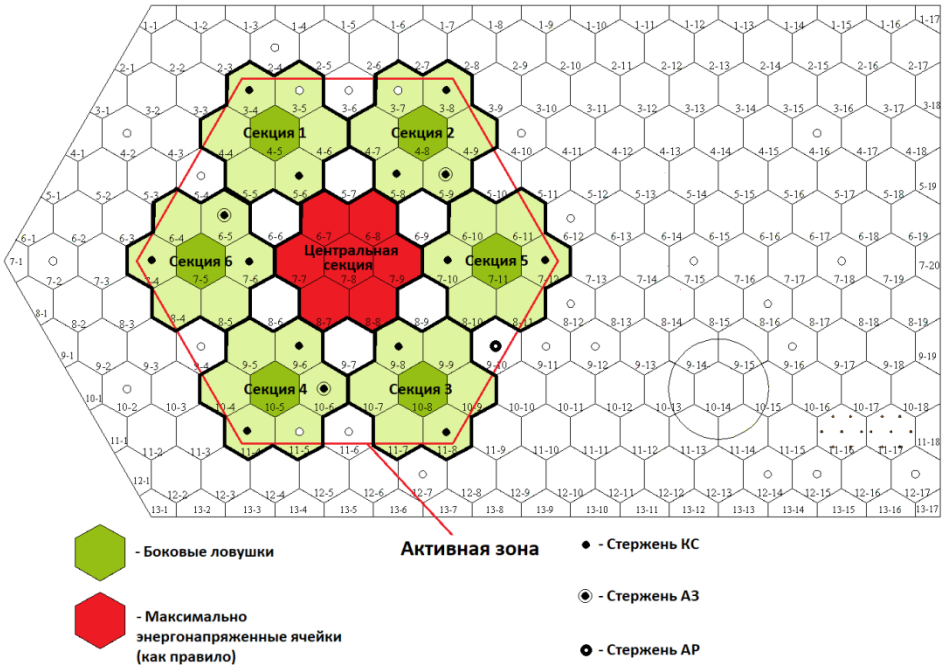


Рисунок 2 – Активная зона ИЯР ИВВ-2М

При выборе ячеек для размещения облучаемых устройств были рассмотрены варианты облучения образцов в боковых ловушках активной зоны. Однако, данные ячейки не обеспечивают необходимые нейтронно-физические характеристики, в частности, повреждающая доза 3 СНА в течение года не накапливается, при этом выгорание образцов превышает 15%, а высокое энерговыделение (около 110-120 Вт/г) не позволяет достичь температурных режимов – литийсодержащие образцы нагреваются более 600 °С. Поэтому, при проектировании устройств для проведения послереакторных исследований рассмотрена возможность облучения образцов внутри полостей ТВС, расположенных в периферийных внешних секциях активной зоны. Внутри полостей ТВС энергетический спектр нейтронов более жесткий, по сравнению с боковыми ловушками, что приводит к быстрому набору образцами повреждающей дозы, в результате имеется возможность с использованием тонкостенного кадмиевого экрана добиться для литийсодержащих образцах соотношения 3 СНА к 12% выгорания лития в течение 9-10 месяцев облучения.

Для облучения образцов с измерением выхода трития, размещение внутри полости ТВС не представляется возможным. В данной эксперименте необходима организация двух независимых газовых контуров, а также использование защитных экранов, снижающих энерговыделение в образцах для обеспечения температуры на образцах 400 – 500 °С, что приводит к увеличению габаритов устройства. Поэтому, данные образцы принято решение облучать в боковой ловушке секции 4.

Результаты и обсуждение

В результате проведенных расчетов были получены данные, которые позволили спроектировать облучательные устройства для проведения полномасштабного эксперимента. Облучательные устройства обеспечивают соблюдение требуемых нейтронно-физических и теплофизических режимов.

Устройства для облучения образцов с последующими послереакторными исследованиями представляют собой герметичный газовый чехол, размещаемый в полости ТВС. Внутри чехла расположена газовая трубка, которая проходит через центральное сечение ампул облучаемыми образцами для организации продувки с целью удаления трития, выделяющегося при облучении. Продувочный газ спускается по трубке вниз, а затем выходит во внутреннее пространство чехла, омывает ампулы и выходит через отводную трубку в верхней части чехла. Ампулы расположены внутри газового чехла и закреплены на продувочной трубке. Между стенками ампул и внутренней стенкой чехла имеется газовый зазор, через который протекает продувочный газ. Зазор также служит для целей регулирования температуры. Для контроля температуры образцов, внутри стенок ампул размещены термопары.

Облучение образцов NM и CB необходимо проводить внутри раздельных устройств. Это сделано во избежание загрязнения бериллийсодержащих материалов тритием, поскольку имеется вероятность негерметичного запечатывания ампул с бериллийсодержащими образцами.

При облучении литийсодержащих образцов принято решение использовать кадмиевые тонкостенные экраны (толщина 2 мм), которые будут размещаться в плотную к внешней стенке Это позволяет снизить энерговыделение внутри образцов таким образом, что при использовании в качестве продувочного газа гелия удается обеспечить температуру 350 °C, а при использовании большего газового зазора и с продувкой неоном удается получить температуры свыше 900 °C.

При расчетах было установлено, что для облучения образцов в форме шариковых засыпок, оптимальной конфигурацией является кольцевая засыпка в 3-4 слоя шариков. Во-первых, шарики имеют невысокую теплопроводность, поэтому укладка с большим числом слоев или же засыпка в цилиндрический объем приводит к появлению радиальной температурной неравномерности более 50 °C на образцах. В данном эксперименте это приводит к неравномерной повреждаемости образцов. Во-вторых, при облучении в цилиндрическом объеме происходит неравномерный набор повреждающей дозы образцами. Конечно, имеется азимутальная неравномерность, но при засыпке в большее число слоев, к ней добавляется и радиальная неравномерность. При наборе периферийными образцами повреждающей дозы 3 СНА, центральные набирают около 2.8 СНА.

Ампулы для облучения бериллийсодержащих образцов отличаются от ампул с литийсодержащими образцами. Они не имеют центральной продувочной трубки, поскольку внутри размещены цилиндрические образцы большого диаметра. Для данных образцов не требуется понижение удельного энерговыделения, поэтому облучение происходит без использования кадмиевых экранов.

Основной разогрев бериллийсодержащих образцов происходит за счет гамма-облучения, при этом удельное массовое энерговыделение составляет около 5-6 Вт/г. Однако, при проведении расчетов установлено, что образцы $LaPb_3$ имеют более высокое энерговыделение, так в центральном сечении активной зоны для данных образцов оно составляет около 8.2 Вт/г. Учитывая высокую плотность образца, это становится проблемой, поскольку данные образцы по сравнению с бериллиевыми имеют гораздо большее абсолютное тепловыделение, что приводит к появлению осевых температурных неравномерностей в ампулах с образцами более 50 °С. В результате, после анализа расчетных данных решено было отказаться от облучения данных образцов, признав невозможным их размещение в ампулах.

Для облучения образцов с исследованием выхода трития принято решение использовать устройство не чехлового, а ампульного типа. Эскиз показан на рисунке 3. Устройство состоит из двух ампул, на рисунке показана высокотемпературная ампула.

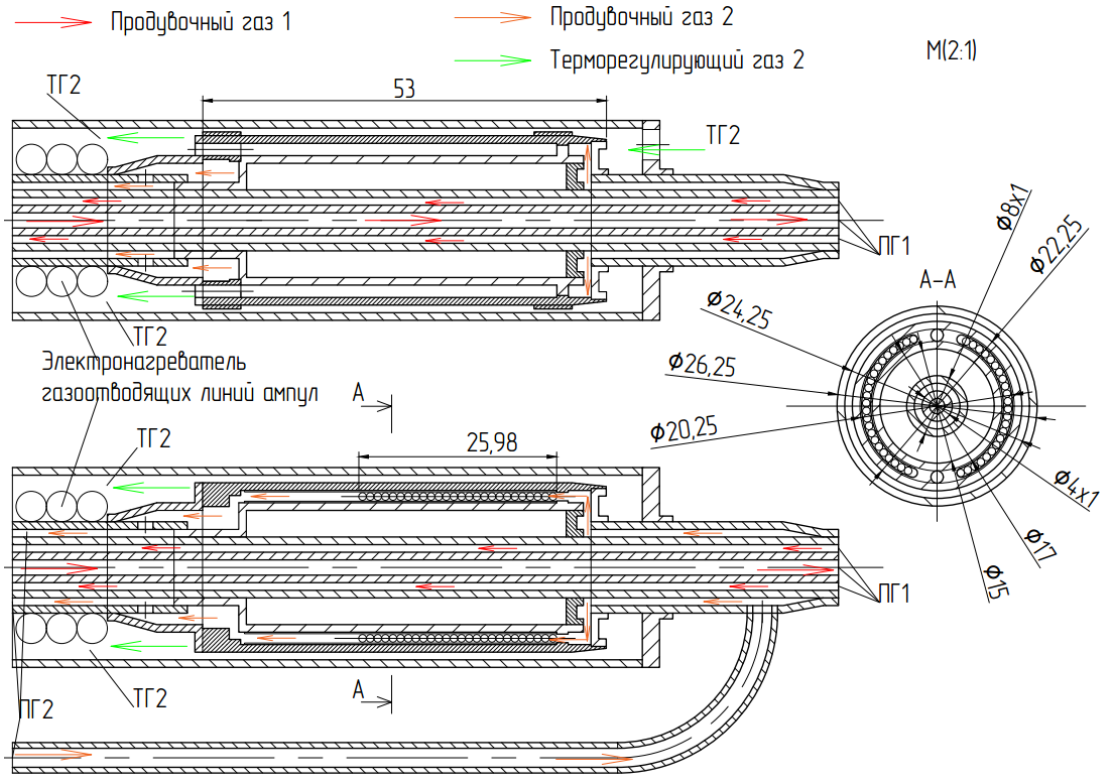


Рисунок 3 – Эскиз ампулы для облучения образцов с исследованием выхода трития

Низкотемпературная ампула конструктивно практически не отличается от нее. Ампулы по высоте расположены симметрично центра активной зоны, низкотемпературная расположена ниже центра.

Данное устройство имеет два независимых газовых контура: продувочный, предназначенный для удаления трития и терморегулирующий, в котором находится газ, изменяемый в процессе облучения. Облучаемые образцы представляют собой шариковую засыпку с диаметром шариков 1 мм, расположенную внутри металлической гильзы, в которой проточены две полукольцевые полости. Такое расположение позволяет максимально увеличить удельное массовое энерговыделение внутри шариков, при этом сохраняя возможность регулировать температуру в заданных пределах. Также, размещение шариков в полости в один ряд позволяет снизить температурные неравномерности по высоте и радиусу засыпок – в данной ампуле неравномерность составляет менее 30 °C.

Для данного эксперимента был рассчитан теоретический выход трития, в расчет не принят механизм кинетики выхода трития. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Наработка трития в эксперименте с исследованием выхода трития

Облучаемый материал	Наработка трития в начале облучения, Бк/с	Генерация трития за 1-й реакторный цикл, Ки
Капсула 1 (600–900 °C): 30LMT90		
засыпка 1a	$(1.11\pm0.2)\cdot10^5$	4.95±0.07
засыпка 1b	$(1.08\pm0.3)\cdot10^5$	4.82±0.07
Итого:		9.77±0.07
Капсула 2 (400–650 °C): 30LMT90		
засыпка 2a	$(7.41\pm0.1)\cdot10^4$	5.56±0.07
засыпка 2b	$(6.98\pm0.1)\cdot10^4$	5.24±0.07
Итого:		10.80±0.07

По приведенным данным можно сделать вывод о максимальном возможном количестве трития, который будет регистрироваться в течение одного реакторного цикла в случае, когда весь тритий, наработанный в течение цикла выйдет из образца.

Заключение

На основании данных, полученных в ходе работы, сделан вывод о возможности проведения облучения материалов, которые рассматриваются в

качестве кандидатов для бланкета реактора ИТЭР в активной зоне реактора ИВВ-2М. По результатам нейтронно-физических и теплофизических расчетов спроектированы облучательные устройства, позволяющие достичь требуемых параметров облучения.

Принято решение провести облучение теплофизических макетов в 2022 году, с целью практического подтверждения полученных расчетных параметров, а также с целью проведения дальнейшего полномасштабного эксперимента по облучению образцов.

Библиографический список

1. Progress in technology at JET / A. S. Kaye, H. Altman, R. Albanese [et al.]. – DOI 10.13182/FST05-A716 // Fusion Science and Technology. – 2005. – Vol. 636. – P. 602–607.
2. Scientific and engineering advances from fusion materials / S. J. Zinkle, M. Victoria, K. Abe. – DOI 10.1016/S0022-3115(02)01088-7 // Journal of Nuclear Materials. –2002. – Vol. 31. – P. 307–311.
3. Капышев В. К. Воздействие нейтронного облучения на прочностные свойства керамических литийсодержащих таблеток, предназначенных для бланкетов термоядерных реакторов / В. К. Капышев // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Термоядерный синтез». – 2001. – Вып. 1. – С. 51–57.
4. Analysis of tritium retention in beryllium pebbles in EXOTIC, PBA and HIDOBE-01 experiments / A. V. Fedorov, S. van Til, L. J. Magielsen, M. P. Stijkel. – DOI 10.1016/j.jnucmat.2013.03.010 // Journal of Nuclear Materials. – 2013. – Vol. 442. – P. 1–3.

УДК 535.333

Хариноева Т. А., Мартынов И. Л., Баранова А. А., Вербицкий Е. В., Чистяков А. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОСТАБИЛЬНОСТИ ОРГАНИЧЕСКИХ ЛЮМИНОФОРОВ В МИКРОРЕЗОНАТОРАХ ИЗ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

Аннотация. Одним из перспективных методов детектирования взрывчатых веществ является оптический флуоресцентный метод. Он основан на тушении флуоресценции чувствительного люминофора при его взаимодействии с молекулами взрывчатого вещества за счет фотоиндуцированного переноса электрона. Параметры флуоресцентных сенсоров могут быть улучшены за счет внедрения люминофора в пористую среду с развитой поверхностью, например, в матрицу пористого кремния со свойствами фотонного кристалла. Работа подобных сенсоров в реальных условиях осложняется за счет неспецифического падения флуоресцентного сигнала. Одной из причин деградации флуоресценции является фотодеградация под действием возбуждающего излучения, в особенности синего и УФ спектрального диапазона. Данная работа посвящена исследованию фотостабильности люминофоров классов производные пиримидина и полифениленвинилены, внедренных в микрорезонатор из пористого кремния.

Ключевые слова: фотостабильность, сенсоры, пиримидины, полифениленвинилены, пористый кремний, микрорезонатор.

Abstract. One of the promising methods for detecting explosives is an optical fluorescence method. It is based on the fluorescence quenching of a sensitive luminophore during its interaction with explosive molecules due to the photoinduced electron transfer. Parameters of the fluorescent sensors can be improved by embedding the luminophore into porous medium with developed surface, for example, into a porous silicon matrix with the properties of a photonic crystal. The operation of such sensors in real conditions is complicated by the process of a nonspecific degradation in the fluorescent signal. One of the reasons of degradation of fluorescence is the photodegradation under the action of exciting radiation, especially in blue and UV spectral range. This work is dedicated to the study of photostability of luminophores that belong to classes of pyrimidine and polyphenylenevinylene derivatives embedded into porous silicon microcavity

Keywords: photostability, sensors, pyrimidines, PPV, porous silicon, microcavity.

Введение

В настоящее время активно развивается флуоресцентный метод детектирования нитроароматических соединений и других взрывчатых веществ. Данный метод основан на тушении флуоресценции (ФЛ) чувствительного люминофора за счет фотоиндуцированного переноса электрона при взаимодействии с молекулами взрывчатого вещества [1, 2]. Данный метод может быть реализован как в жидкости, так и, что более ценно с практической точки

зрения, в газовой фазе [3-7]. Преимуществами такого подхода являются бесконтактность, отсутствие предварительной пробоподготовки, низкое энергопотребление и малые габариты соответствующих детекторов. В качестве чувствительных люминофоров в настоящее время используют различные вещества [8-11], среди которых наиболее популярными являются низкомолекулярные органические люминофоры [4, 12-13] и органические полимеры с сопряженными связями [5, 7, 10-11].

Полимеры с сопряженными связями обеспечивают возможность эффективной пространственной миграции возбужденного экситона [2], в результате чего одна молекула аналита может привести к тушению значительного фрагмента полимерной цепи. В низкомолекулярных люминофорах эффект миграции экситона отсутствует; в результате тушение флуоресценции в сенсорах на их основе происходит по механизму, когда на одну молекулу люминофора приходится одна молекула аналита. Однако, они могут обладать значительным временем жизни возбужденного состояния [9], их синтез проще, а структура и энергетический спектр разнообразней, что потенциально позволяет создавать более селективные сенсоры.

Для улучшения эффективности сбора флуоресцентного сигнала и увеличения эффективной площади поверхности сенсора чувствительные люминофоры могут быть нанесены на поверхности с волноводным эффектом [6] или внедрены в матрицы с развитой поверхностью [4]. В качестве удачного примера такой матрицы можно привести пористый кремний (ПК) [14], структуры на основе которого дополнительно могут обладать свойствами фотонного кристалла. Люминофоры, внедренные в микрорезонаторы из ПК, демонстрируют сужение спектра флуоресценции и высокую направленность излучения [5, 15].

В целом, приборы для детектирования взрывчатых веществ на основе метода тушения флуоресценции демонстрируют на сегодняшний день чувствительность, сравнимую с другими общепризнанными методиками, например, спектрометрией ионной подвижности и газовой хроматографией. Так, заявленная чувствительность некоторых разработок достигает $10^{-13} – 10^{-12}$ г/см^3 [4] и 10^{-15} г/см^3 [6].

Вместе с тем для обеспечения корректной работы сенсорного элемента в реальных условиях, необходимо учитывать другие эффекты, влияющие на амплитуду флуоресцентного сигнала. Среди таких эффектов можно выделить эффект естественной фотодеградации люминофоров под действием возбуждающего излучения, в особенности синего и УФ спектрального диапазона. Под действием такого излучения в люминофорах могут происходить фотохимические реакции, в частности, реакция фотоокисления [16, 17].

Настоящая работа посвящена исследованию фотостабильности низкомолекулярного люминофора 5triphenylamino-4-(triphenylaminothiophen-2-yl)-pyrimidine (HEM-461) и полимера с сопряженными связями poly[2-methoxy-5-(3′,7′-dimethyloctyloxy)-1,4-phenylenevinylene] (MDMO-PPV), внедренных в микрорезонаторы из пористого кремния. Оба люминофора демонстрируют чувствительность флуоресценции к парам нитроароматических соединений [3, 7, 16] и являются перспективными для практических применений.

Образцы и методика эксперимента

Полимер MDMO-PPV был приобретен в Sigma-Aldrich и использовался без какой-либо дополнительной очистки. Низкомолекулярный люминофор HEM-461 был синтезирован в Институте органического синтеза им. И. Я. Постовского УрО РАН.

Микрорезонаторы из ПК были изготовлены стандартным методом электрохимического анодирования монокристаллического кремния [18] в спиртовом растворе 50% плавиковой кислоты (в соотношении $HF:C_2H_5OH$ – 3:7). Были использованы пластины p-типа, легированные бором с ориентацией (100) и удельным сопротивлением 0,003-0,005 Ом·см производства Telecom-STV. Плотность тока травления составляла 4,6 мА/см^2 для слоев низкой пористости и 65 мА/см^2 для слоев высокой пористости. Времена травления подбирались таким образом, чтобы характерная толщина слоев составляла около 90 нм и 120 нм для слоев низкой и высокой пористости соответственно. Параметры пористости и толщины слоев оценивались на основе данных работы [19]. После изготовления микрорезонаторы подвергались термическому окислению при температуре 700 °C.

Изготовленные микрорезонаторы состояли из двух брэгговских зеркал и расположенной между ними полости. Верхнее брэгговское зеркало образовано 4 парами слоёв высокой и низкой пористости и дополнительным первым слоем низкой пористости [5], нижнее – 15 парами слоёв. Резонаторный слой был образован слоем высокой пористости удвоенной толщины.

Внедрение люминофоров в микрорезонаторы производилось из раствора при повышенном давлении 3 атм [20]. В качестве растворителя использовался толуол, раствор имел концентрацию 0,5 мг/мл как для HEM-461, так и для MDMO-PPV. Характерное время выдерживания микрорезонаторов в растворе люминофоров при повышенном давлении составляло 3 мин. Механизм внедрения основан на действии капиллярных сил [5], а повышенное давление призвано стабилизировать этот процесс и сделать его более эффективным [20].

Для измерения оптических характеристик изготовленных образцов использовалась модульная спектральная система на основе спектрометра Ocean Optics USB2000+, укомплектованного вольфрамовым галогенным источником LS-1 и лазерным диодом с длиной волны излучения 450 нм.

Исследуемый образец во время проведения экспериментов располагался в герметичной камере, атмосферу в которой можно было менять с воздушной на азотную, а также проводить измерения при пониженном давлении (до 3 мбар). Для измерения спектров отражения использовался волоконный зонд QR200-7-UV-VIS и эталонное интерференционное зеркало BB05-E02 (Thorlabs). При измерении спектров флуоресценции излучение лазерного диода фокусировалось на поверхности микрорезонатора с помощью ахроматического конденсора PS-2 (Solar LS). Сбор флуоресцентного сигнала производился с помощью этого же конденсора. Спектральное разделение флуоресцентного и возбуждающего излучений производилось с помощью дихроичного зеркала. Интенсивность возбуждающего излучения (I_{ex}) на поверхности образца могла варьироваться в диапазоне от 0,05 до 10 Вт/см^2. Для регистрации временной зависимости сигнала флуоресценции люминофоров в матрице ПК для каждой интенсивности возбуждающего излучения использовалась отдельная точка (область) на поверхности образца. Полученные зависимости нормировались на начальную амплитуду сигнала.

Результаты и обсуждение

Спектральные характеристики изготовленных образцов приведены на рисунке 1. Видно, что изготовленные микрорезонаторы имеют широкую запрещенной фотонную зону в диапазоне от 500 до 750 нм и узкую собственную моду с характерной шириной на полувысоте 5-7 нм. Положение собственной моды приходилось на длину волны из диапазона 565-570 нм. В пределах одного образца спектр отражения демонстрировал достаточно высокую стабильность, что косвенно свидетельствует об однородности изготовленных фотонных структур.

При внедрении в микрорезонатор спектры флуоресценции как HEM-461, так и MDMO-PPV претерпевали значительные изменения. Сами спектры сужались, а их максимум смещался на длину волны, соответствующей собственной моде микрорезонатора. При этом излучение флуоресценции приобретало высокую степень направленности. Согласно современным представлениям данные эффекты обусловлены многолучевой интерференцией и модификацией плотности фотонных состояний в микрорезонаторах и других фотонных структурах [15].

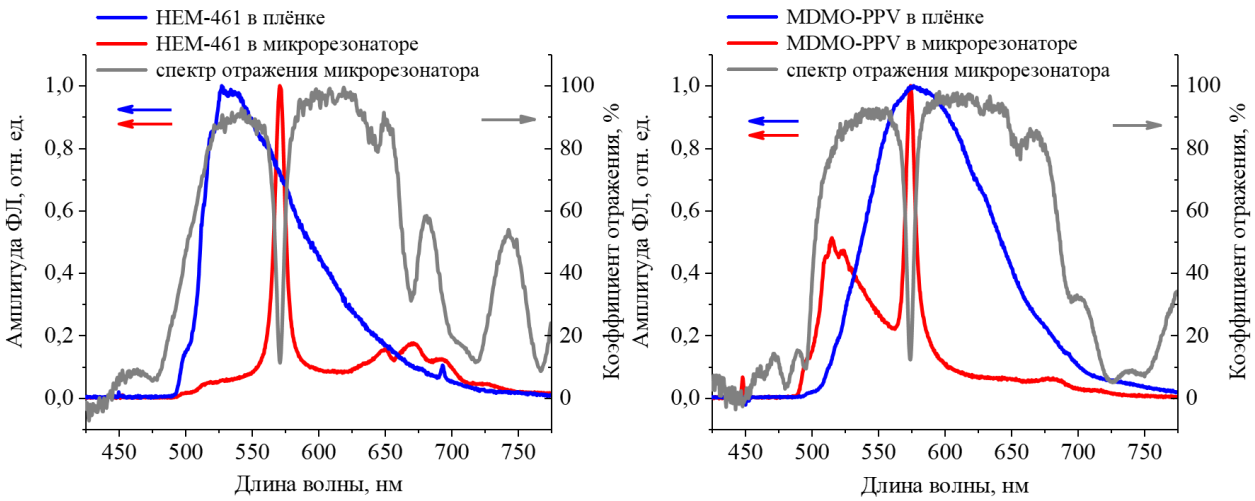


Рисунок 1 – Спектры отражения микрорезонаторов из ПК и флуоресценции HEM-461 (*слева*) и MDMO-PPV (*справа*) в микрорезонаторе и в плёнке

Измеренные зависимости амплитуды флуоресценции (I_{fl}) от времени при различных интенсивностях возбуждения на воздухе в условиях нормального давления для органических люминофоров HEM-461 и MDMO-PPV представлены на рисунке 2.

Как видно на графиках, по мере воздействия на образцы возбуждающего излучения наблюдается постепенное падение амплитуды сигнала. Для обоих образцов скорость падения флуоресцентного сигнала монотонно увеличивалась по мере возрастания интенсивности возбуждающего излучения. При этом характер зависимостей также менялся. Для I_{ex} менее 0,2 Вт/см^2 экспериментальные кривые удовлетворительно приближались моноэкспоненциальной зависимостью. При большем значении I_{ex} аналогичное приближение могло быть выполнено только с помощью суммы двух или трех экспоненциальных функций с весовыми коэффициентами A_i (1).

$$I_{fl}(t) = \sum_i A_i \cdot e^{\frac{-t}{\tau_i}} \quad (1)$$

При этом характерные значения τ_i могли отличаться более чем на порядок.

Согласно литературным данным причиной наблюдаемой деградации флуоресценции являются фотохимические реакции [16-17, 21-22], характерные для органических молекул с сопряженными π-связями. Для выяснения степени влияния молекул кислорода на наблюдаемую фотодеградации флуоресцентного сигнала были проведены дополнительные измерения в азотной среде и в воздушной среде при пониженном давлении. Было обнаружено, что в обоих случаях при идентичных значениях интенсивности возбуждающего излучения

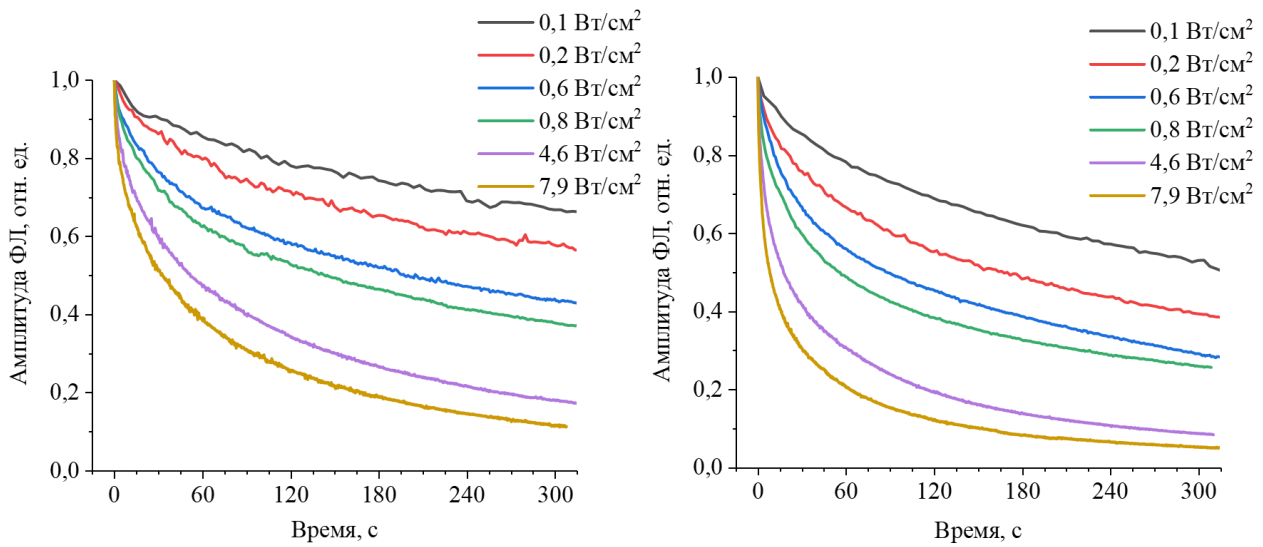


Рисунок 2 – Графики зависимости амплитуды флуоресценции от времени при различных интенсивностях возбуждающего излучения для образцов с HEM-461 (*слева*) и MDMO-PPV (*справа*) на воздухе при нормальном давлении

скорость падения флуоресцентного сигнала замедлилась на порядок, как для HEM-461, так и для MDMO-PPV. Таким образом, можно сделать вывод, что основной причиной наблюдаемой деградации флуоресценции являются фотохимические реакции с участием молекул кислорода, в частности реакция фотоокисления [21, 23]. В процессе этих реакций постепенно снижается концентрация молекул люминофора, способных эффективно флуоресцировать под действием возбуждающего излучения n_l. Для описания динамики изменения n_l в процессе фотохимической реакции можно воспользоваться кинетическим уравнением вида (2):

$$-\frac{dn_l(t)}{dt} = k \cdot n_l^* \cdot n_{O_2}, \qquad (2)$$

где n_l^* – концентрация молекул люминофора, находящихся в возбужденном состоянии; n_{O_2} – концентрация молекул кислорода; k – константа скорости фотохимической реакции.

Интенсивность возбуждающего излучения в работе на несколько порядков ниже характерной интенсивности насыщения электронных переходов в органических молекулах [24]. Следовательно, можно считать, что концентрация возбуждённых молекул люминофора пропорциональна интенсивности возбуждающего излучения и описывается формулой (3) [25].

$$n_l^* = \frac{\sigma \cdot \tau}{\hbar\omega} \cdot I_{ex} \cdot n_l, \qquad (3)$$

где σ – сечение поглощения возбуждающего излучения; τ – время жизни возбужденного состояния люминофора; $\hbar\omega$ – энергия кванта возбуждающего излучения.

С учетом (3) решение уравнения (2) можно записать в виде (4).

$$n_l(t) = n_l(0) \cdot exp(-t/\tau), \qquad (4),$$

где $1/\tau = k \cdot \frac{\sigma \cdot \tau}{\hbar\omega} \cdot I \cdot n_{O_2}$.

В силу того, что сигнал флуоресценции прямо пропорционален n_l, выражение для зависимости флуоресцентного сигнала от времени также должно иметь моноэкспоненциальный вид. При этом скорость деградации флуоресценции должна быть пропорциональна произведению интенсивности возбуждающего излучения на концентрацию молекул кислорода.

Как было отмечено ранее, эмпирически было установлено, что экспериментальные данные с высокой точностью могут быть приближены суммой нескольких экспоненциальных зависимостей, с различными характерными временами τ (1). Обнаруженная не моноэкспоненциальность зависимости амплитуды флуоресценции от времени воздействия возбуждающего излучения указывает на неоднородность условий протекания фотохимических реакций в пределах облучаемой области исследуемых образцов. Экспериментальные данные свидетельствуют, что данная неоднородность возрастает при увеличении интенсивности возбуждающего излучения. Анализ выражения (4) показывает, что различные значения τ могут быть обусловлены разницей в интенсивности возбуждающего излучения I_{ex} и различным значением концентрации молекул кислорода. Профиль интенсивности возбуждающего излучения как по площади облучаемой поверхности, так и по глубине образца не может зависеть от абсолютного значения I_{ex}. С другой стороны, проникновение молекул кислорода вглубь микрорезонатора происходит за счет диффузии, скорость которой в пористой среде ограничена [26]. Таким образом, разумно предположить, что по мере увеличения интенсивности возбуждающего излучения концентрация молекул кислорода в глубине микрорезонатора не успевает восстанавливаться. В результате формируется градиент концентрации молекул кислорода по глубине микрорезонатора, что в конечном счете влияет на кинетику деградации флуоресцентного сигнала исследуемых образцов.

Приближение экспериментальных данных с помощью суммы нескольких экспоненциальных функций позволяет провести количественный анализ характерного времени падения амплитуды флуоресцентного сигнала. В качестве количественной характеристики мы можем взять средневзвешенное время [27] и

скорость деградации флуоресценции, равную обратному средневзвешенному времени. Результаты такого анализа для обоих образцов представлены на рисунке 3.

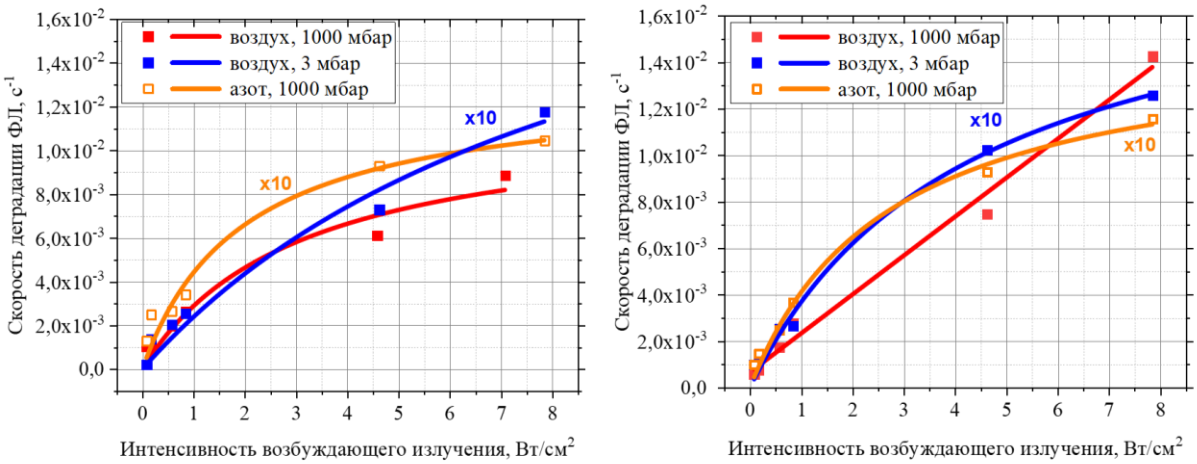


Рисунок 3 – Графики зависимости скорости деградации флуоресценции HEM-461 (*слева*) и MDMO-PPV (*справа*) в микрорезонаторе из ПК от интенсивности возбуждающего излучения при различных условиях

Видно, что при возрастании интенсивности возбуждающего излучения происходит увеличение скорости деградации флуоресценции. Скорость фотодеградации на воздухе при атмосферном давлении для образцов на основе MDMO-PPV несколько выше, чем для образцов на основе HEM-461. Кроме того, зависимость скорости фотодеградации от I_{ex} для образцов на основе MDMO-PPV близка к линейной, в то время как для образцов на основе HEM-461 скорость деградации постепенно переходит в насыщение. Таким образом, экспериментальные данные указывают, что на воздухе образцы на основе HEM-461 обладают большей фотостабильностью.

При снижении концентрации молекул кислорода в окружающей среде за счет вакуумирования или напуска азота скорость фотодеградации для всех образцов падает минимум на порядок. При этом для всех образцов уже при ~ 2 Вт/см^2 представленные зависимости начинают заметно отклоняться от линейных и постепенно выходят на насыщение. Данный результат согласуется с предположением о том, что скорость деградации флуоресценции под действием возбуждающего излучения в исследуемых образцах ограничена скоростью диффузии молекул кислорода вглубь микрорезонатора из ПК.

Для сравнения в рамках работы дополнительно были проведены исследования для образцов MDMO-PPV и HEM-461 в виде пленок на стеклянных подложках с характерной толщиной ~100 нм. Данные образцы были получены

методом центрифугирования растворов люминофоров в толуоле. Было установлено, что образцы в виде пленок также демонстрируют значительную деградацию флуоресценции под действием возбуждающего излучения. Однако, при одинаковой интенсивности возбуждающего излучения скорость фотодеградации флуоресценции люминофора в плёнке значительно (до 5 раз) превышает скорость фотодеградации люминофора в микрорезонаторе из ПК. Это указывает на более высокую фотостабильность используемых люминофоров при их внедрении в матрицу из ПК.

Заключение

В процессе исследований продемонстрировано, что амплитуда флуоресценции люминофоров HEM-461 и MDMO-PPV, внедренных в микрорезонаторы из ПК, под действием непрерывного возбуждающего излучения с длиной волны 450 нм и интенсивностью возбуждения в диапазоне 1-10 Вт/см^2 деградирует более чем в двое на временном интервале в несколько минут. Было установлено, что на воздухе при атмосферном давлении скорость падения амплитуды флуоресценции для образцов на основе полимера MDMO-PPV линейно зависит от интенсивности возбуждающего излучения вплоть до 10 Вт/см^2, в то время как для образцов на основе HEM-461 скорость деградации флуоресценции постепенно переходит в насыщение.

При снижении концентрации молекул кислорода в окружающей среде за счет понижения давления до 3 мбар или замены воздушной среды на азотную скорость фотодеградации исследуемых образцов снизилась на порядок. При этом для всех образцов, в том числе и для образцов на основе MDMO-PPV, зависимости скорости фотодеградации от интенсивности возбуждающего излучения имеют нелинейный характер и постепенно выходят на насыщение.

Полученные экспериментальные данные и сведения из литературных источников указывают, что наиболее вероятной причиной процесса фотодеградации исследуемых образцов являются фотохимические реакции с участием молекул кислорода, в частности, реакция фотоокисления. Сделано предположение, что насыщение скорости деградации флуоресценции обусловлено ограниченной скоростью диффузии молекул кислорода внутрь микрорезонатора из пористого кремния. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации режимов возбуждения флуоресцентных сенсоров молекул нитроароматических соединений на базе фотонных структур из пористого кремния.

Благодарности

Вербицкий Е. В выражает благодарность за финансовую поддержку в части синтеза Министерству науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания на проведение научных исследований (проект номер АААА-А19-119011790132-7).

Библиографический список

1. Buryakov I. A. Optical chemical sensors for the detection of explosives and associated substances / I. A. Buryakov, T. I. Buryakov, V. T. Matsaev. – DOI 10.1134/S1061934814070041 // Journal of Analytical Chemistry. – 2014. – Vol. 69, Iss. 7. – P. 616–631.
2. Sun X. Fluorescence based explosive detection: from mechanisms to sensory materials / X. Sun, Y. Wang, Y. Lei. – DOI 10.1039/C5CS00496A // Chemical Society Reviews. – 2015. – Vol. 44, Iss. 22. – P. 8019–8061.
3. Conjugated polymer-based explosives sensor: Progresses in the design of a handheld device / L. Marques, H. D. Burrows, L. M. Martelo, T. Neves. – DOI 10.1109/icsens.2014.6985278 // IEEE Sensors. – 2014. – Vol. 203. – P. 1415–1418.
4. New 4,5-di(hetero)arylpyrimidines as sensing elements for detection of nitroaromatic explosives in vapor phase / E. V. Verbitskiy, A. A. Baranova, K. I. Lugovik [et al.]. – DOI 10.1016/j.dyepig.2016.10.039 // Dyes and Pigments. – 2016. – Vol. 137. – P. 360–371.
5. Deep Infiltration of Emissive Polymers into Mesoporous Silicon Microcavities: Nanoscale Confinement and Advanced Vapor Sensing / N. A. Tokranova, S. Novak, J. Castracane, I. Levitsky. – DOI 10.1021/JP405071N // Journal of Physical Chemistry C. – 2013. – Vol. 117, Iss. 44. – P. 22667–22676.
6. Using novel fluorescent polymers as sensory materials for above-ground sensing of chemical signature compounds emanating from buried landmines / C. J. Cumming, C. Aker, M. Fisher [et al.]. – DOI 10.1109/36.927423 // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2001. – Vol. 39, Iss. 6. – P. 1119–1128.
7. Silicon photonic structures with embedded polymers for novel sensing methods / E. Osipov, I. Martynov, D. Dovzhenko [et al.]. – DOI 10.1134/S0030400X17010222 // Optics and Spectroscopy. – 2017. – Vol. 122, Iss. 1. – P. 74–78.
8. Hu Z. Luminescent metal-organic frameworks for chemical sensing and explosive detection / Z. Hu, B. J. Deibert, J. Li. – DOI 10.1039/C4CS00010B // Chemical Society Reviews. – 2014. – Vol. 43, № 16. – P. 5815–5840.
9. Fei T. Highly sensitive TNT photoluminescent sensing by a phosphorescent complex / T. Fei, K. Jiang, T. Zhang. – DOI 10.1016/j.snb.2014.03.088 // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2014. – Vol. 199. – P. 148–153.
10. Gopalakrishnan D. Direct detection of RDX vapor using a conjugated polymer network / D. Gopalakrishnan, W. Dichtel. – DOI 10.1021/ja402668e // Journal of the American Chemical Society. – 2013. – Vol. 135, Iss. 22. – P. 8357–8362.
11. Turn-off Fluorescent Sensing of Energetic Materials using Protonic Acid doped Polyaniline: A Spectrochemical Mechanistic Approach / P. Veerabhadragouda, Sh.

D. Pattathil, V. B. Patil [et al.]. – DOI 10.1007/s10854-021-06537-7 // Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie. – 2020. – Vol. 647, Iss. 4. – P. 331–340.
12. Detection of explosive vapors with a charge transfer molecule: self-assembly assisted morphology tuning and enhancement in sensing efficiency / C. Vijayakumar, G. Tobin, W. Schmitt [et al.]. – DOI 10.1039/b921520d // Chemical communications. – 2010. – Vol. 46, Iss. 6. – P. 874–876.
13. Pyrimidine-based dyes embedded in porous silicon microcavities for detection of nitroaromatic compounds / I. L. Martynov, E. Osipov, Yriy A. Kuzishchin [et al.]. – DOI 10.1117/12.2534674 // Conference: Counterterrorism, Crime Fighting, Forensics, and Surveillance Technologies III. – 2019. – Vol. 11166. – https://www.researchgate.net/publication/336402091_Pyrimidine-based_dyes_-embedded_in_porous_silicon_microcavities_for_detection_of_nitroaromatic_compounds (accessed: 13.01.2021).
14. Fluorescent polymer-porous silicon microcavity devices for explosive detection/ I. A. Levitsky, W. Euler, N. Tokranova, A. Rose. – DOI 10.1063/1.2432247 // Applied Physics Letters. – 2007. – Vol. 90, Iss. 4. – P. 041904.
15. Enhancement of spontaneous emission of semiconductor quantum dots inside one-dimensional porous silicon photonic crystals / D. Dovzhenko, I. Martynov, P. Samokhvalov [et al.]. – DOI 10.1364/oe.401197 // Optics Express. – 2020. – Vol. 28, Iss. 15. – P. 22705–22717.
16. Photobleaching of MEH-PPV thin films: Correlation between optical properties and the nanoscale surface photovoltage / E. Palacios-Lidon, E. Escasain, E. López-Elvira [et al.] // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2013. – Vol. 117. – P. 15–21.
17. Photo-oxidation of electroluminescent polymers studied by core-level photoabsorption spectroscopy / D. Sutherland, J. Carlisle, P. R. Elliker [et al.]. – • DOI 10.1063/1.116298 // Applied Physics Letters. – 1996. – Vol. 68, Iss. 15. – P. 2046–2048.
18. Sailor M. J. Porous silicon in practice: preparation, characterization and applications / M. J. Sailor. – Weinheim : Wiley-VCH, 2012. – XII, 249 p.
19. Influence of electro-chemical etching parameters on the reflectance spectra of porous silicon rugate filters / R. Rakhimov, E. Osipov, D. Dovzhenko [et al.]. – DOI 10.1088/1742-6596/737/1/012026 // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 737. – P. 012026.
20. The embedment of conjugated MDMO-PPV polymer in microcavities of porous silicon at excess pressure from solution / E. V. Osipov, I. Martynov, M. N. Kur'yanova, A. Chistyakov. – DOI 10.1134/S1063785018050103 // Technical Physics Letters. – 2018. – Vol. 44, Iss. 5. – P. 392–394.
21. Dithienoquinazolines – A convenient synthesis by the oxidative photocyclization of 4,5-dithienyl-substituted pyrimidines and their photophysical properties / E. V. Verbitskiy, P. Slepukhin, M. Valova [et al.]. – DOI 10.1002/EJOC.201403212 // European Journal of Organic Chemistry. – 2014. – Vol. 2014, Iss. 36. – P. 8133–8141.

22. Heteroacenes Bearing the Pyrimidine Scaffold: Synthesis, Photophysical and Electrochemical Properties / E. V. Verbitskiy, E. M. Cheprakova, N. I. Makarova [et al.]. – DOI 10.1002/EJOC.201501450 // European Journal of Organic Chemistry. – 2016. – Vol. 2016, Iss. 7. – P. 1420–1428.
23. Suppressing photooxidation of conjugated polymers and their blends with fullerenes through nickel chelates / M. Salvador, N. Gasparini, J. D. Perea [et al.]. – DOI 10.1039/C7EE01403A // Energy and Environmental Science. – 2017. – Vol. 10, Iss. 9. – P. 2005–2016.
24. Giuliano C. Nonlinear absorption of light: optical saturation of electronic transitions in organic molecules with high intensity laser radiation / C. Giuliano, L. Hess // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1967. – Vol. 3, Iss. 8. – P. 358–367.
25. Orazio S. Principles of Lasers / S. Orazio, H. David. – London ; New York : Springer Science+Business Media, 2010. – DOI 10.1007/978-1-4419-1302-9.
26. Gelir A. Elucidation of the pore size and temperature dependence of the oxygen diffusion into porous silicon / A. Gelir, O. Yargi, S. Yuksel. – DOI 10.1016/J.TSF.2017.07.007 // Thin Solid Films. – 2017. – Vol. 636. – P. 602–607.
27. Lakowicz J. R. Principles of Fluorescence Spectroscopy / J. R. Lakowicz. – New York : Springer, 2006. – XXVI, 954 p.

УДК 621.039:004.92

Розаненков И. Э., Потеряев С. Н., Сивинских И. А., Ташлыков О. Л.

3-D МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ КОМПЛЕКСА ПО ПЕРЕРАБОТКЕ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Аннотация. В статье рассматривается пример использования 3D-моделирования в качестве эффективного средства визуализации компоновки оборудования и технологических процессов комплекса по переработке радиоактивных отходов (РАО). В условиях работы с источниками ионизирующих излучений использование 3D-моделирования позволяет добиться снижения материальных затрат, времени для проектирования и разработки объектов, а также оптимизации дозовых нагрузок на персонал.

Ключевые слова: Радиоактивные отходы, 3D-моделирование, САПР Ревит, защита от ионизирующих излучений, оптимизация радиационной защиты.

Abstract. The article examines an example of using 3D modeling as an effective means of visualizing the layout of equipment and technological processes of a complex for the processing of radioactive waste (RW). In the conditions of work with sources of ionizing radiation, the use of 3D-modeling allows to achieve a reduction in material costs, time for the design and development of facilities, as well as optimization of dose loads on personnel.

Keywords: Radioactive waste, 3D-modeling, CAD Revit, protection against ionizing radiation, optimization of radiation protection

Введение

В публикации Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ) 2007 года подчеркивается усиление принципа оптимизации радиационной защиты, который должен равно применяться ко всем ситуациям облучения при условии ограничений индивидуальных доз и радиационных рисков, а именно: введение граничных доз и рисков для ситуаций планируемого облучения и референтных уровней для ситуаций аварийного облучения и существующего облучения [1].

С учетом достигнутых результатов в атомной отрасли России, дальнейшая оптимизация радиационной защиты должна определяться реализацией комплекса мероприятий, направленных на управление индивидуальными дозами, а также управление индивидуальными рисками. Для дальнейшего повышения уровня радиационной защиты персонала, оптимизации индивидуальных доз облучения, количества облучаемых лиц в АО «Концерн Росэнергоатом» реализуется «Программа оптимизации радиационной защиты персонала на АЭС» (2020-2024 гг.), а в Госкорпорации «Росатом» действуют МУ

2.6.5.054-2017 «Оптимизация радиационной защиты персонала предприятий» [2].

Принцип оптимизации имеет важное практическое значение для обеспечения радиационной безопасности на всех этапах жизнедеятельности объектов использования атомной энергии (ОИАЭ), начиная с проектирования и заканчивая выводом из эксплуатации АЭС [3], [4].

Принцип оптимизации, являющийся одним из основных в обеспечении радиационной безопасности, может быть реализован несколькими путями [5]. Например, при экранировании источников излучения, значительный потенциал имеет оптимизация состава композитных радиационно-защитных материалов (РЗМ) применительно к планируемым условиям облучения. Так, зависимость поглощающей способности защитных материалов от энергии гамма-квантов, испускаемых изотопами, входящими в состав радиоактивных загрязнений, определяет возможность реализация принципа оптимизации при проектировании состава гомогенных РЗМ [6]. В свою очередь, радиоизотопный состав зависит от многих факторов (например, типа реакторной установки, режимов эксплуатации, времени, прошедшему с момента остановки реактора) [7].

Среди направлений оптимизации особое внимание уделяется сокращению времени пребывания персонала в радиационных полях. Это может быть достигнуто тщательным планированием, эффективным управлением работами, тренировками по выполнению операций на макетах и компьютерных моделях оборудования и систем в чистой зоне, а также при использовании высокопроизводительного оборудования [8].

Процесс проектирования радиационно-опасных объектов должен строиться не только на создании 2D чертежей, но и на создании подробных 3D-моделей оборудования, помещений и сооружений. В свою очередь модель должна нести в себе не только визуальную составляющую, но и информационную. Виртуальная модель объекта может сократить время строительства и позволить более эффективно планировать и проводить работы по ремонту и демонтажу оборудования, особенно радиоактивного. А также повысить эффективность оптимизации радиационной защиты персонала [9,10].

Наглядность, то есть визуальное отображение технологических систем и процессов необходимо разрабатывать инженерам не только при проектировании и строительстве какого-либо объекта, но и для внешних нужд: для презентации проекта заказчику, общественности, чтобы каждый мог легко уяснить суть и разобраться в этапах предлагаемых процессов, даже не имея специализированных знаний.

Создание трехмерных моделей является наиболее эффективным и в конечном счете экономичным способом наглядного иллюстрирования конструкционного исполнения оборудования, систем и технологического процесса в целом.

На этапе строительства и монтажа оборудования трёхмерные модели значительно упрощают реализацию проводимой работы, сокращая время на изучение схем и чертежей.

Методы и технологии

Первую кафедру компьютерной графики, в Университете Юты, открыли в 1960-х годах Айван Сазерленд и Дэвид Эванс. Сазерленд создал программу, которая являлась прообразом всех современных 3D-редакторов и CAD-систем (САПР – система автоматизированного проектирования) – Sketchpad. [11].

Колоссальный прорыв в развитии САПР произошел с появлением первой версии системы AutoCAD. Она была выпущена в 1982 году компанией Autodesk. В конце XX века проектирование перестало существовать исключительно в плоскости чертежа и перешло в трехмерные модели. С этого момента можно говорить о распространении концепции информационного моделирования зданий и начале истории BIM-технологий [12].

BIM (Building Information Modeling или Building Information Model – моделирование информации для строительства) – это цифровое представление физических и функциональных характеристик объекта, которое охватывает более чем просто геометрию здания. представляет собой максимально полную базу данных по объекту. В нее входят архитектурный проект, техническая документация, развернутые сметы, календарный график строительства и другие важные сведения. Кроме того, проектирование с применением BIM-технологий – это коллективный процесс, в котором принимают участие сотрудники разных специальностей. С информационной моделью работают архитекторы, проектировщики, дизайнеры, сметчики, инженеры, строители и др.

В январе 2002 года Autodesk приобрела «Ревит» (Revit) – компанию-поставщика программного обеспечения для архитектурного моделирования. Компания была основана несколькими программистами из компании «ПиТиСи». Сегодня Revit занимает доминирующую позицию внутри Отдела компании Autodesk по разработке приложений для строительства.

Для создания компьютерной 3-D графики используют множество различных САПР. Условно их можно разделить на следующие группы: по сложности и приложениям [13].

Группы САПР по сложности:

– САПР двумерного проектирования – «2D-3D Легкие – Нижний уровень». Эти САПР служат для выполнения почти всех работ с двумерными чертежами и имеют ограниченный набор функций по трехмерному моделированию. С помощью этих систем выполняются большинство всех работ по проектированию. Характерные представители таких САПР – AutoCAD, CADdy, CADMECH Desktop, MasterCAM, T-FlexCAD, OmniCAD, Компас-График;
– САПР объемного моделирования «3D – Средний уровень». По своим возможностям они полностью охватывают САПР «легкого веса», а также позволяют работать со сборками, по некоторым параметрам они уже не уступают тяжелым САПР, а в удобстве работы даже превосходят. Обязательным условием является наличие функции обмена данными (или интеграции). Это не просто программы, а программные комплексы, в частности, SolidWorks SolidEdge, Cimatron, Form-Z, Autodesk Revit, Inventor, CAD SolidMaster, и все еще продолжающий развиваться, Mechanical Desktop, DesignSpace;
– САПР объемного моделирования «3D Тяжелые – Верхний уровень». Эти системы применяются для решения наиболее трудоемких задач - моделирования поведения сложных механических систем в реальном масштабе времени, оптимизирующих расчетов с визуализацией результатов, расчетов температурных полей и теплообмена и т.д. Обычно в состав системы входят как чисто графические, так и модули для проведения расчетов и моделирования, постпроцессоры для станков с ЧПУ. Примерами «тяжелых» САПР могут служить такие продукты, как ADAMS, ANSYS, CATIA, EUCLID3, Pro/ENGINEER, UniGraphics.

Группы САПР по приложениям:

– САПР для применения в отраслях общего машиностроения (пакеты: SolidWorks, Autodesk Inventor (AutoCAD), КОМПАС, CATIA);
– САПР для радиоэлектроники (пакеты: Altium Designer, OrCAD, Autodesk Inventor (Electronic CAD-P-CAD);
– САПР в области архитектуры и строительства (пакеты: Autodesk Architectural Desktop, AutoCAD Revit, Bentley MicroStation, Bentley AECOsim Building Designer, Piranesi, ArchiCAD).

Описание объекта проектирования (центра по переработке и хранению радиоактивных отходов)

Рассмотрим пример использования программы 3D-моделирования Autodesk Revit 2018 при проектировании регионального центра по обращению с радиоактивными отходами *(использовалась только учебная версия программы).*

Проектируемый региональный центр кондиционирования и долговременного хранения радиоактивных отходов предназначен для переработки и приведения в безопасное состояние РАО, накопленных в хранилищах, а также образующихся в процессе эксплуатации, и вывода из эксплуатации объектов, расположенных в данном регионе, обеспечения приема и переработки радиоактивных материалов, образованных в результате деятельности предприятий региона [14].

Технологический процесс непосредственной переработки отходов состоит из следующих операций:

1. Входной контроль поступающих контейнеров с РАО;
2. Сортировка РАО по морфологическому составу (черный, цветной металл, неметаллические РАО, строительные материалы и т.д.);
3. Фрагментация РАО до размеров, обусловленных последующим технологическим процессом: прессование, дезактивация, упорядоченное размещение в бочках, сжигание.

Перечень проводимых операций с РАО:

– измельчение;
– сухая дезактивация;
– жидкостная дезактивация;
– сушка;
– сжигание;
– прессование;
– цементирование;
– размещение переработанных ТРО в контейнерах;
– герметизация контейнеров с переработанными ТРО;
– выдержка контейнеров с зацементированными ТРО;
– передача на временное хранение.

Блок-схема обращения с РАО, поступающими в центр, показана на рисунке 1.

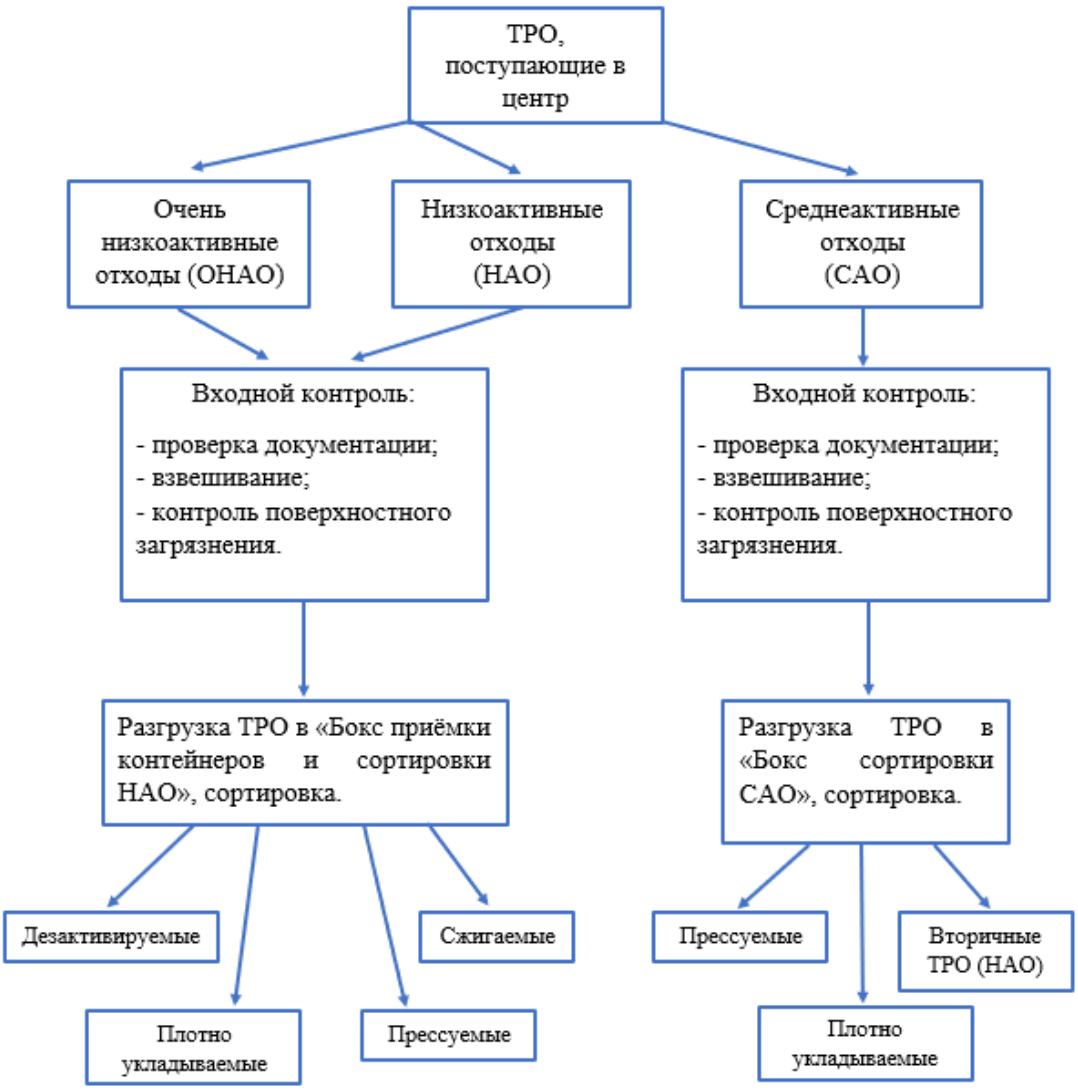


Рисунок 3 – Блок-схема обращения с РАО

Использование программы 3D-моделирования Autodesk Revit 2018

В программе мы можем моделировать оборудование (различные боксы для работы с РАО, ванны для дезактивации, печи, бункеры, транспортные срадства и т.д.), при этом мы сразу производя проверку совместимости её деталей (проверку правильности чертежей). Также возможно создавать точки подключения сред (системы дезактивации, системы дренажа и т.д.), вентиляции и электроснабжения. На основе созданных 3D-моделей ПО Revit позволяет сразу же создать необходимую проектную и рабочую документацию.

На стадии размещения готовых моделей на общем плане объекта проводится проверка на коллизию объектов, пример которой показан на рис. 2 (*а*). Кроме того, на этапе размещения оборудования ПО Revit позволяет предусмотреть необходимые технологические пространства для ремонта,

обслуживания и эксплуатации оборудования, трубопроводов и систем. На рисунке 2 (*б*) заложено необходимое пространство для нормальной эксплуатации шарового крана и возможности демонтажа балансировочного клапана.

После подключения необходимых сред и систем к оборудованию, мы можем наглядно моделировать технологические процессы обращения с РАО, пример представлен на рисунке 2 (*в*).

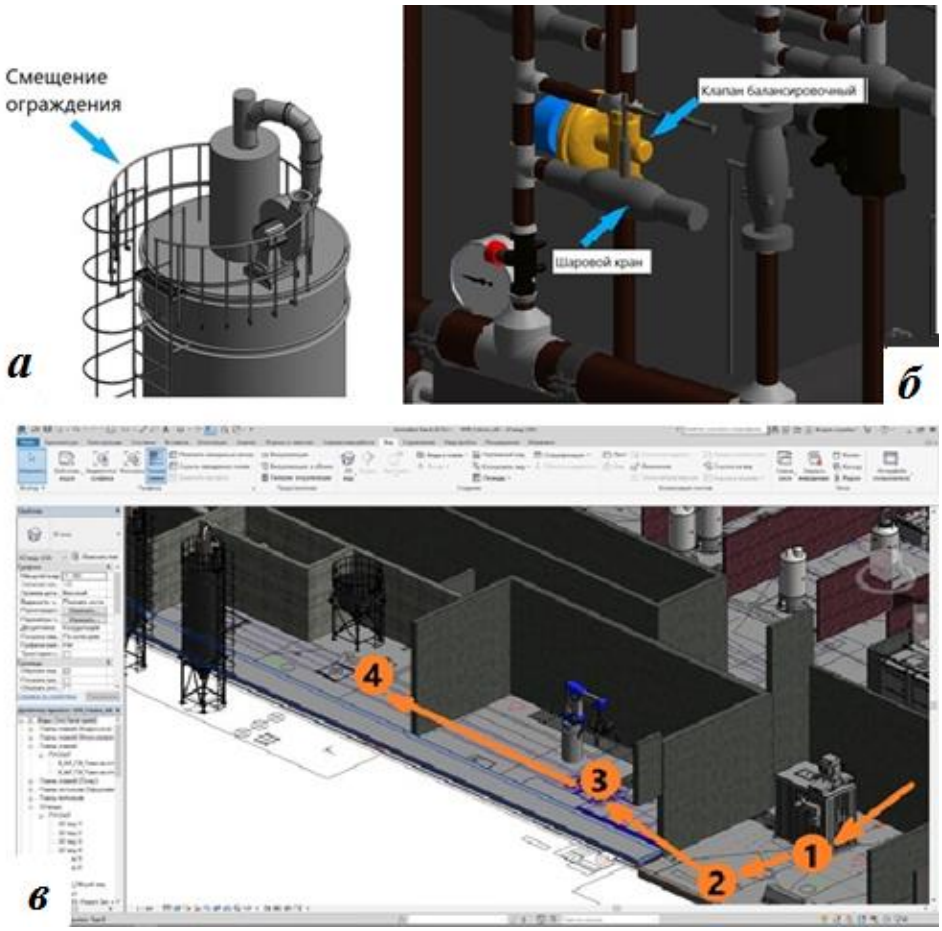


Рисунок 4 – Рабочие окна Revit 2018: а – коллизия объектов;
б - технологическое пространство; в - общий вид узла прессования, сжигания и цементирования комплекса

Позиции, представленные на рисунке 2(в), обозначают последовательность технологического процесса:

Фрагментированные НАО, упакованные в спецмешки (бумажные крафт-пакеты), поступают в установку сжигания, после которой зольный остаток выгружают и герметизируют в полиэтиленовые пакеты, размещаемые в бочках объемом 200 л.;

Газы из установки сжигания подаются в систему газоочистки;

Фрагментированные ТРО, упакованные в бочки объемом 200 л., поступают на установку прессования. Полученные на установках сжигания и прессования брикеты и бочки соответственно размещаются в контейнеры НЗК-150-1,5П;

На установку цементирования поступают ЖРО для приготовления цементного компаунда, а также контейнеры НЗК-150-1,5П для заливки свободного пространства цементным компаундом.

Общая 3D-модель помещения с оборудованием позволяет:

- определить возможные несостыковки и ошибки в технологических процессах;
- оценить «заполненность» помещений, найти возможные места образования заторов;
- оптимизировать маршруты персонала в зонах работы с ИИИ [15,16];
- предусмотреть маршруты и пути следования грузоподъёмного оборудования и средств перемещения грузов;
- обеспечить совмещение во времени выполнения основных и вспомогательных операций.

Перспективным направлением оптимизации радиационной защиты персонала является использование виртуальных моделей радиационно-опасных объектов для решения задач маршрутизации радиационно-опасных работ [17]. Основной целью решения задач маршрутной оптимизации является нахождение минимума функционала качества – суммарной дозы облучения при выполнении комплекса работ в нестационарных радиационных полях [18].

$$\sum_{i=1}^{n} \dot{H}_i \times t_i \rightarrow min$$

где $\dot{H}_i$ – мощность дозы в i-ой изодозной области, t_i – время нахождения человека в i-той изодозной области.

Технология работы Autodesk Revit

Всего существует 5 этапов построения семейств – уникальных объектов (рис. 3):

- Анализ;
- Построение каркаса – рисунок 3 (*а*);
- Построение объемной геометрии – рисунок 3 (*б*);
- Настройка графики – рисунок 3 (*в*);
- Сборка модели представлена на рисунке 3 (*г*), на примере узла дозирования и герметичной упаковки золы).

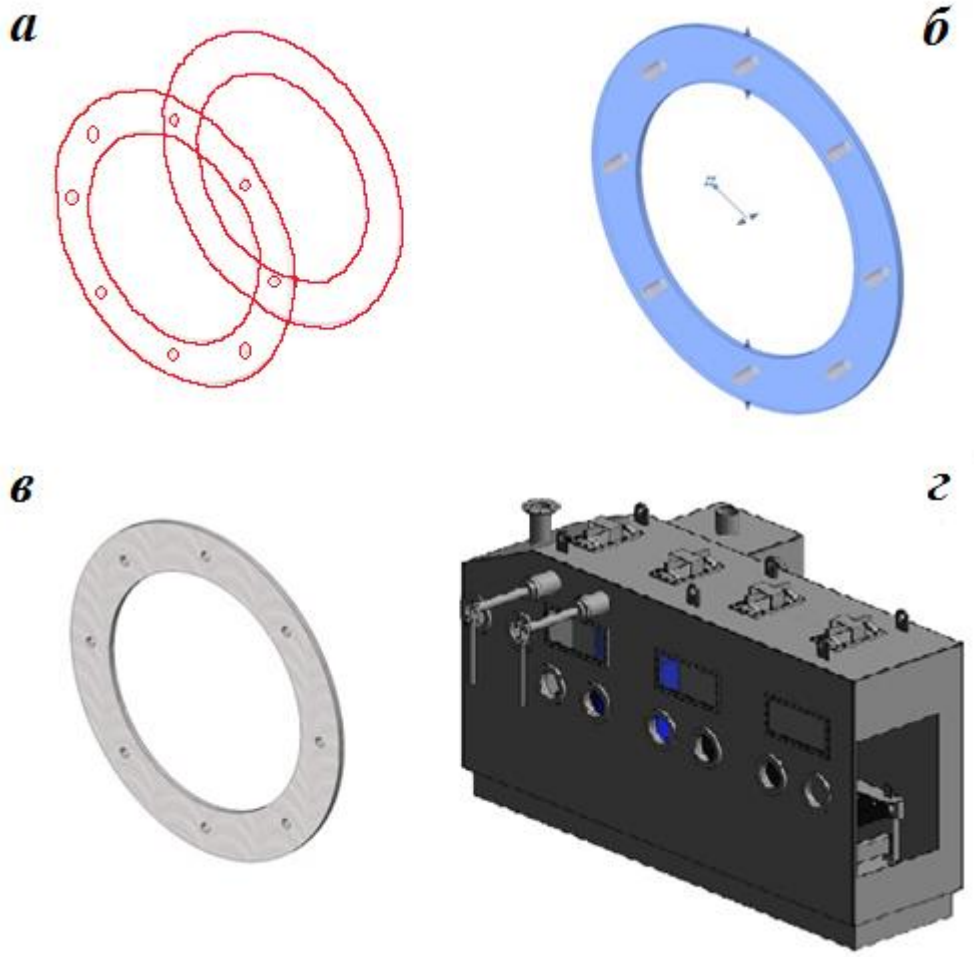


Рисунок 3 – Этапы построения семейства Revit

В целом создание проекта в Revit выполняется в следующей последовательности:

– Выполняется предварительная «разбивка» будущего здания по высоте (на этажи, при помощи инструмента «Уровень») и по горизонтали (на блоки, при помощи инструмента «Ось»). Данные элементы составят «скелет» будущей модели;
– Создается трехмерная модель здания. В процессе работы используются предварительно созданные библиотечные элементы («семейства» в терминологии Revit), содержащие «шаблон» элемента модели: например, двутавровая балка, сечение которой загружается из нормативного справочника (что ускоряет процесс проектирования), но которая может быть выполнена любой длины в модели. Таким образом в модели размещаются стены, перекрытия, окна и двери, сантехническое оборудование и т.д.;
– Размещаются и настраиваются дополнительные элементы, такие как «Помещения» и «Зоны», выполняется наполнение элементов

атрибутивной информацией, например, указываются марки, артикулы элементов; проводится анализ здания на соответствие архитектурным, конструктивным, санитарным, противопожарным и другим требованиям. При необходимости выполняется корректировка модели;

– Выполняется создание «видов» модели – планов этажей, фасадов и разрезов, локальных фрагментов модели. Виды размещаются на листах чертежей в определенном масштабе. Получаемые виды модели могут быть глубоко настроены, например, на некоторых чертежах определенные элементы могут быть отключены, либо настроены более сложным образом;
– Чертежи дополняются аннотациями: выносками, текстовыми примечаниями, табличными данными. Данные элементы так же сохраняют ассоциативную связь с 3D-моделью;
– Выполняется печать чертежей или передача 3D-модели и документации, например, для последующего использования в другом программном обеспечении.

Заключение

3D-моделирование является прогрессивным методом проектирования различных объектов, особенно ОИАЭ, существенно экономит ресурсы и время, затрачиваемые на проектирование и организацию технологических процессов, позволяет детально проиллюстрировать каждый этап технологического процесса, обеспечить наглядность всего проекта в целом.

В условиях работы с радиоактивными отходами детальная проработка систем и процессов может значительно снизить дозовую нагрузку персонала.

При необходимости оснащения ОИАЭ новым оборудованием или вывода его из эксплуатации, разработанный 3D-проект может быть использован для планирования и организации процессов модернизации или демонтажа.

Библиографический список

1. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103 // Annals of the ICRP. – 2007. – Vol. 37, Iss. 2/4. – URL: https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%-20103 (accessed: 12.05.2021).
2. Ташлыков О. Л. Ремонт оборудования атомных станций : учебник / О. Л. Ташлыков. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 352 с. – ISBN 978-5-7996-2381-4.
3. МУ 2.6.5.054-2017. 2.6.5. Атомная энергетика и промышленность. Оптимизация радиационной защиты персонала предприятий Госкорпорации

«Росатом : метод. указ. / О. А. Кочетков, Ю. В. Абрамов, В. Н. Клочков [и др.]. – Москва : Федеральное медико-биологическое агентство, 2017 г. 52 с.
4. OECD. Организация работы в целях оптимизации радиационной защиты от профессионального облучения на атомных электростанциях. – Paris : [S. l.], 2009. – 114 s.
5. Михайлова А. Ф. Пути реализации принципа оптимизации в радиологической защите персонала / А. Ф. Михайлова, О. Л. Ташлыков // Ядерная физика и инжиниринг. – 2018. – Т. 9, № 4. – С. 393–401.
6. Экспериментально-теоретическое исследование органометаллических радиационно-защитных материалов, адаптированных к источникам излучения со сложным изотопным составом / И. М. Русских, Е. Н. Селезнев, О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин // Ядерная физика и инжиниринг. – 2014. – Т. 5, № 5. – С. 449–455.
7. Оптимизация состава гомогенных радиационно-защитных материалов применительно к планируемым условиям облучения / О. Л. Ташлыков , С. Е. Щеклеин, И. М. Русских [и др.] // Атомная энергия. – 2016. – Т. 121, № 4. – С. 233–236.
8. Ташлыков О. Л. Дозовые затраты персонала в атомной энергетике. Анализ. Пути снижения. Оптимизация : монография / О. Л. Ташлыков. – Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2011. – 232 s.
9. Zavadskii D. I Optimization of radiation protection of staff using BIM-designing / D. I. Zavadskii, O. L. Tashlykov. – DOI 10.1063/5.0032419 // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2313, Iss. 1. – P. 070017.
10. Завадский Д. И. Использование BIM-проектирования при планировании радиационно-опасных работ / Д. И. Завадский, О. Л. Ташлыков // Ядерные технологии: от исследований к внедрению – 2019 : сб. материалов науч.-практ. конф. (Нижний Новгород, 17–18 окт. 2019 г.). – Нижний Новгород, 2019. – С. 44–45.
11. Render.ru – крупнейший российский ресурс по компьютерной графике и 3D технологиям, 3D история // Render : информ. ресурс. – URL: http://www.render.ru/books/show_book.php?book_id=285 (дата обращения: 12.05.2021).
12. Уэйсберг Д. Революция в инженерном проектировании: люди, компании и компьютерные системы, которые навсегда изменили инженерную практику. Гл. 2, 8 : пер. с англ. / Д. Уэйсберг. – Ярославль : ЯГТУ, 2010. – 119 с. – ISBN 978-5-9914-0143-2.
13. Классификация систем САПР // Центр измерительных технологий и промышленной автоматизации. – URL: http://www.automationlabs.ru/index.php/sw/135-2008-06-24-22-10-27 (дата обращения: 12.05.2021).
14. Региональный центр кондиционирования и долговременного хранения радиоактивных отходов в приморском крае. Площадка бухта Сысоева отделения Фокино ДВЦ «ДальРАО-филиала ФГУП «РосРАО». Материалы для общественных слушаний. Оценка воздействия намечаемой деятельности

на период эксплуатации зданий и сооружений регионального центра кондиционирования и долговременного хранения радиоактивных отходов в Приморском крае на окружающую среду (ОВОС 1). Текстовая часть. Ч. 1, кн. 1. 116-01-ОВОС 1. – [Б. м.] : б. и., 2015. – 252 с. – URL: https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1640255462&tld=ru&lang=ru&name=dalraokniga2.pdf&text=14 (дата обращения: 12.05.2021).

15. Ташлыков О. Л. Виртуальные технологии обучения в решении проблемы снижения облучаемости ремонтного персонала / О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин // Дистанционное и виртуальное обучение. – 2010. – № 8. – С. 48–57.
16. Ташлыков О. Л. АЭС: Продление ресурса и снятие с эксплуатации : учебник / О. Л. Ташлыков ; науч. ред. С. Е. Щеклеин. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2020. – 216 с. – ISBN 978-5-7996-3142-0.
17. Использование метода динамического программирования для оптимизации демонтажа оборудования энергоблоков АЭС, выводимых из эксплуатации, с целью минимизации облучения / Ф. А. Балушкин, А. Н. Сесекин, О. Л. Ташлыков [и др.] // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2009. – № 4. – С. 169–176.
18. Подсистема автоматизированной обработки данных нерегламентных измерений радиационной обстановки / Ю. А. Кропачев О. Л. Ташлыков, А. Н. Сесекин [и др.] // Ядерная и радиационная безопасность. – 2019. – № 3 (93). – С. 26–35.