

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Кобелев Антон Михайлович

**КОМБИНИРОВАННЫЙ СПОСОБ ПЕРЕРАБОТКИ РЕАКТОРНОГО  
ГРАФИТА В ВОДЯНОМ ПАРЕ И ОКСИДНО-СОЛЕВЫХ РАСПЛАВАХ**

05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование,  
эксплуатацию и вывод из эксплуатации

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2021

Работа выполнена в научно-исследовательском отделении учебно-научного комплекса пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ ФГБОУ ВО «Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий».

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент,  
**БАРБИН Николай Михайлович**

Официальные оппоненты: **ХОМЯКОВ Анатолий Павлович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, заведующий кафедрой машин и аппаратов химических производств;

**ГУДИМ Юрий Александрович**, доктор технических наук, профессор, ООО Промышленная компания «Технология металлов», г. Челябинск, заместитель генерального директора по научной работе;

**СЛЮНЧЕВ Олег Михайлович**, кандидат технических наук, ФГУП «Производственное объединение «Маяк»» г. Озерск, Челябинская обл., начальник группы по обращению с жидкими и газоаэрозольными радиоактивными отходами центральной заводской лаборатории

Защита состоится «22» апреля 2021 г. в 14:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 05.03.04 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И - 420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=2009>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Ташлыков Олег Леонидович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Около 10% доли в мировом производстве энергии занимают атомные электростанции, которые вносят свою долю в борьбе с глобальным потеплением, что предотвращает выброс в атмосферу около 32 млрд. тонн CO<sub>2</sub>. Всего в мире эксплуатируется 450 ядерных энергоблоков общей электрической мощностью 398 ГВт. В России на 10 атомных станциях в промышленной эксплуатации находятся 36 энергоблоков (21 энергоблок с реакторами типа ВВЭР (3 энергоблока с ВВЭР-1200, 13 энергоблоков с ВВЭР-1000 и 5 энергоблоков с ВВЭР-440), 13 энергоблоков с канальными реакторами (10 энергоблоков с реакторами типа РБМК-1000 и 3 энергоблока с ЭГП-6), 2 энергоблока с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым охлаждением (БН-600 и БН-800)). Общая электрическая мощность всех энергоблоков – 30,25 ГВт.

Одно из основных преимуществ атомной энергетики – ее относительная низкая стоимость. Однако в стоимость эксплуатации не закладываются затраты на исследования, аварийные затраты, расходы на вывод из эксплуатации реакторов, хранение ядерных отходов.

К настоящему моменту остановлены и ведутся работы по выводу из эксплуатации ПУГР, реакторов Белоярской, Ленинградской, Билибинской, Обнинской АЭС. Завершается срок эксплуатации энергетических реакторов РБМК и ЭГП. На ближайший период около 10-15 лет ресурс большинства блоков с учетом продления срока службы будет исчерпан.

По разным оценкам, суммарное количество облученного реакторного графита в России достигает 60 тыс. тонн. Помимо России, проблема обращения с облученным реакторным графитом актуальна для Великобритании, где его накоплено более 86 тыс. т., США – 55 тыс. т. и Франции – 23 тыс. т. Общее количество накопленного во всем мире облученного графита составляет около 250 тыс. т.

Обращение с облученным графитом, в том числе его кондиционирование для целей захоронения является одной из критических задач.

Решение вопроса по захоронению, усугубляется наличием в составе графитовых изделий долгоживущих радионуклидов (например, период полураспада <sup>243</sup>Am – 7370 лет), а также тем, что графит является пожароопасным материалом с высокой удельной теплотой сгорания. Этот факт усугубляется наличием в облученном графите запасенной энергии Вигнера.

В документе МАГАТЭ констатируется, что единой стратегии по переработке графита в мире не принято, но большинство стран намерены скорее захоронивать графит в геологических формациях, чем его дезактивировать. В определенной степени такое решение обусловлено очень медленным прогрессом в создании эффективной технологии переработки.

В ФЗ РФ «Об обращении с радиоактивными отходами и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» №190 от 11.07.2011 установлено, что окончательной стадией обращения с РАО является захоронение. Такие факторы, как, технико-экономическое обоснование,

расположение ядерной установки, наличие транспортной инфраструктуры от ядерной установки к приповерхностному пункту захоронения радиоактивных отходов, радионуклидный состав отходов и другие определяют выбор стратегии обращения с реакторным графитом уран-графитовых реакторов – захоронение «на месте», захоронение в приповерхностном или глубинном пункте захоронения РАО. Пунктов захоронения нет не только в России, но и нигде в мире. Принято решение о создании подземной исследовательской лаборатории в Нижнекамском горном массиве в гранитных породах Красноярского края на глубине 475 м. Будут загружены имитаторы по тепловыделению и по другим физическим свойствам РАО и в течение длительного времени будут проводиться исследования. Подземная лаборатория начнет функционировать только в 2025 году, если испытания пройдут успешно, то захоранивать РАО начнут только к 2040 году.

В приказе Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору «Об утверждении федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Сбор, переработка, хранение и кондиционирование твердых радиоактивных отходов. Требования безопасности» №243 от 25 июня 2015 года в п. 5 установлено, что при сборе, переработке, хранении и кондиционировании ТРО необходимо обеспечить: – сокращение объема ТРО с учетом технологических и экономических факторов.

В настоящее время наиболее перспективными способами обращения с отработавшими графитовыми материалами являются сжигание.

Предлагаются разные способы сжигания графита: традиционное, в кипящем слое, с помощью плазмохимического реактора, газификация графита с помощью перегретого водяного пара (пиролиз), беспламенное окисление в расплаве одного из карбонатов щелочных металлов или их смесей в присутствии оксида свинца. По оценке специалистов, сжигание отработанного графита даст в итоге твердые радиоактивные отходы, готовые для длительного захоронения, объемом 1-2 % от первоначального объема графита.

С целью совершенствования (уменьшение рабочей температуры переработки, замена оксида свинца первого класса опасности на оксиды меди и никеля второго класса опасности) существующих способов переработки и удешевления технологии переработки реакторного графита предлагается применить комбинированный способ – переработка внешнего (наиболее радиоактивного) слоя графитового блока в оксидно-солевых расплавах  $\text{CuO} - \text{C} - \text{NaCl} - \text{KCl}$ ,  $\text{NiO} - \text{C} - \text{NaCl} - \text{KCl} - \text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NiO} - \text{C} - \text{NaCl} - \text{KCl}$ ) и газогенераторная переработка оставшейся внутренней части графитового блока в парах воды.

**Степень разработанности темы исследования.** Проблемы утилизации реакторного графита уран-графитовых реакторов занимались: А.А. Цыганов, В.И. Хвостов, Е.А. Комаров, С.Г. Котляревский, А.О. Павлюк, И.В. Шаманин, В.Н. Нестеров, М.А. Туктаров, Л.А. Андреева, А.А. Роменков, J. Liu, Е.Д. Домашев, В.М. Симановский, А.В. Бушуев, Ю.М. Верзилов, В.Н. Зубарев, Т.Б. Алеева, А.Ф. Кожин, Н.А. Гирке, В.П. Рублевский, О.А. Ярмоленко, В.П. Александров, И.М. Завьялова, Н.А. Сударева, Б.К. Былкин, Г.Б. Давыдова, А.В.

Краюшкин, В.А. Шапошников, Е.Г. Кудрявцев, И.В. Гусаков-Станюкович, Е.Н. Камнев, Л.П. Синельников, О.К. Карлина, R. Takahashi, M. Toyahara, S. Maruki, H. Ueda, О.К. Карлина, В.Д. Багаев, И.И. Баранов, Ю.И. Кабанов, И.Д. Куликов, В.Д. Сафутин, В.И. Буланенко, В.В. Фролов, А.Г. Николаев, А.Г. Кохомский, В.И. Бойко, В.В. Шидловский, П.М. Гаврилов, И.В. Шаманин, А.В. Ратман, M. Dubourg, А.М. Михайлец, Е.В. Беспала, А.М. Измestьев и др. Термодинамические исследования различных систем проводили: Г.К. Моисеев, Б.Г. Трусов, Н.А. Ватолин, Г.В. Белов, Н.М. Барбин, Д.И. Терентьев и др. Работы по восстановлению оксидов металлов углеродом проводили: W. Bouklon, R. Durrer, T. Springorum, A. Krupowsky, G. Tamman, А.Я. Зворыкин, А.А. Байков и А.С. Тумарев, Л. Грюнер, И.А. Соколов, А.А. Байков, М.А. Павлов, О.А. Есин, П.В. Гельд, С.Т. Ростовцев, Г.И. Чуфаров, В.П. Елютин, Б.В. Львов, В.Д. Любимов, Г.П. Швейкин, М.С. Курчатov, А.Л. Цефт, И.В. Рябчиков, М.М. Павлюченко, И.Ф. Кононюк, А.Е. Переверзев, А.К. Ашин, С.Т. Ростовцев, О.Л. Костелов, Е.П., Татиевская, М.Г. Журавлева, Б.Д. Авербух, С.С. Лисняк, В.К. Антонов, В.Н. Богословский, Н.М. Стафеева, K. Kodera, I. Kusunoki, S. Shimizu, X.K. Аветисян, В.Ф. Вебер и др.

**Целью данной работы** является создание комбинированного способа переработки реакторного графита в водяном паре и оксидно-солевых расплавах. Для реализации поставленной цели решались следующие задачи:

- Провести обзор и анализ существующих способов переработки реакторного графита, выбрать методики исследований и исследуемые системы;
- Провести термодинамический анализ термических процессов для следующих систем: реакторный графит (С) – пары воды,  $\text{CuO} - \text{C} - \text{NaCl} - \text{KCl} - \text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{K}_2\text{CO}_3$  ( $\text{CuO} - \text{C} - \text{NaCl} - \text{KCl}$ ,  $\text{NiO} - \text{C} - \text{NaCl} - \text{KCl} - \text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NiO} - \text{C} - \text{NaCl} - \text{KCl}$ ) – пары воды (атмосфера воздуха, атмосфера аргона);
- Провести термический и термогравиметрический анализ процесса взаимодействия реакторного графита с оксидно-солевыми расплавами;
- На основе полученных результатов обосновать применение комбинированного способа переработки реакторного графита в водяном паре и оксидно-солевых расплавах.

**Научная новизна работы** заключается в том, что впервые:

- Расширен состав оксидно-солевых систем, применяемых для переработки реакторного графита;
- Получены новые данные об образующихся химических соединениях, о температурных интервалах фазовых состояний радионуклидов присутствующих в реакторном графите для следующих систем: реакторный графит (С) – пары воды,  $\text{CuO} - \text{C} - \text{NaCl} - \text{KCl} - \text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{K}_2\text{CO}_3$  ( $\text{CuO} - \text{C} - \text{NaCl} - \text{KCl}$ ,  $\text{NiO} - \text{C} - \text{NaCl} - \text{KCl} - \text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NiO} - \text{C} - \text{NaCl} - \text{KCl}$ ) – пары воды (атмосфера воздуха, атмосфера аргона);
- Получены новые сведения о влиянии анализируемых оксидно-солевых систем на температурный режим переработки реакторного графита;
- Получены новые данные об окислении и о скорости окисления графита в рассматриваемых оксидно-солевых системах;
- Разработан комбинированный способ переработки реакторного графита в

водяном паре и оксидно-солевых расплавах, разработана технологическая схема и конструкции установок.

**Теоретическая и практическая значимость.** С помощью метода термодинамического моделирования определен равновесный состав систем реакторный графит – пары воды, реакторный графит – оксидно-солевые расплавы – пары воды (атмосфера воздуха, атмосфера аргона). Проведен комплекс экспериментальных исследований: термический и термогравиметрический анализ взаимодействия реакторного графита с оксидами металлов и соевыми расплавами. Разработан комбинированный способ переработки реакторного графита в водяном паре и оксидно-солевых расплавах. Разработаны конструкции установок по переработке реакторного графита. Разработанная компьютерная программа «Модель процесса переработки радиоактивного графита в газогенераторной печи (ГРАФИТ-ГАЗ)» используется при подготовке специалистов направления «Пожарная безопасность» Уральского института ГПС МЧС России. Основные научные положения диссертационного исследования могут пополнить справочные данные.

**Методология и методы диссертационного исследования.** Расчет равновесного состава фаз и параметров равновесия исследуемых систем проводили при помощи программы TERRA с использованием справочной базы данных по свойствам индивидуальных веществ ИВТАНТЕРМО и HSC. Термический анализ процессов, протекающих при нагреве, проводили в нагревательной печи шахтного типа с использованием контрольно-измерительного комплекса. Контрольно-измерительный комплекс состоял из следующего оборудования: модуль аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразователя сигнала (ZET220); персональный компьютер со специальным программным обеспечением; хромель-алюмелевые термопары (ГОСТ Р 8.585 – 2001); лабораторные весы METLER TOLEDO. Термогравиметрический анализ проводился в закрытой муфельной печи с горизонтальной загрузкой (SNOL 30/1100).

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- Результаты термодинамического анализа нагревания реакторного графита для следующих систем: реакторный графит (С) – пары воды, CuO – С – NaCl – KCl – Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> – K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (CuO – С – NaCl – KCl, NiO – С – NaCl – KCl – Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> – K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, NiO – С – NaCl – KCl) – пары воды (атмосфера воздуха, атмосфера аргона);
- Результаты термического исследования взаимодействия реакторного графита с оксидно-солевыми расплавами;
- Результаты термогравиметрического исследования окисления реакторного графита в оксидно-солевых расплавах;
- Комбинированный способ переработки реакторного графита в водяном паре и оксидно-солевых расплавах.

**Достоверность результатов** обеспечивается использованием современных математических методов и программных комплексов, апробированных методик измерений при проведении экспериментальных исследований, хорошим согласованием полученных результатов

с экспериментальными данными других авторов.

**Апробация работы.** Результаты, изложенные в материалах диссертации, доложены и обсуждены на конференциях:

- Международная научно-практическая конференция «Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло», посвящённая 150-летию со дня рождения Владимира Ефимовича Грум-Гржимайло, 2014 г., Екатеринбург;

- Всероссийская конференция XXXI «Сибирский теплофизический семинар», 2014 г., Новосибирск, Всероссийский семинар с международным участием «Радиационная и промышленная экология», г. Ростов-на-Дону, 2016 г.;

- 10-я Международная конференция «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технологии», 2016 г., г. Москва, г. Троицк, ФГБНУ «Технологический институт сверхтвёрдых и новых углеродных материалов»;

- XI Международное Курнаковское совещание по физико-химическому анализу в рамках XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии;

- V Международная конференция «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека», г. Томск, 2016 г.;

- Всероссийская конференция «Химия твёрдого тела и функциональные материалы – 2016», 9 семинар «Термодинамика и материаловедение». Сателлит 22 Менделеевского съезда по общей и прикладной химии, г. Екатеринбург, 2016 г.;

- Всероссийская конференция «XXXIII Сибирский теплофизический семинар», г. Новосибирск, 2017 г.;

- Международная научно-практическая конференция «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2018», г. Севастополь, 2018 г.;

- Всероссийская научная конференция с международным участием «Семинар вузов по теплофизике и энергетике», г. Санкт-Петербург, 2019 г.;

- IV-Конгресс «Техноген – 2019» «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований», г. Екатеринбург, 2019 г.;

- Научно-практическая конференция с международным участием и элементами школы молодых ученых «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершённых фундаментальных исследований и НИОКР», г. Екатеринбург, 2020 г.

По теме диссертации опубликовано 27 научных работ, включая 10 статей в журналах, входящих в перечень, определенный ВАК и Аттестационным советом УрФУ, из них 9 публикаций входят в международные базы данных Scopus и Web of Science. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (номер 2019667735).

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников, одиннадцати приложений. Общий объем диссертации составляет 264 страницы. Список использованных источников содержит 132 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформирована цель и научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов исследований, основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** описано использование реакторного графита в работе атомных электростанций. Приводятся характеристики промышленных и энергетических уран-графитовых реакторов России. Представлена информация о суммарном количестве накопленного облученного реакторного графита в России и во всем мире. Описаны проблемы захоронения реакторного графита. Приведены источники загрязнения и радиационное состояние реакторного графита. Описаны опасность радиоактивного изотопа углерода в окружающей среде и факторы загрязнения. Представлены существующие способы переработки реакторного графита.

Обзор литературы показал, что наиболее перспективным методом переработки реакторного графита является его беспламенное окисление в расплаве одного из карбонатов щелочных металлов или их смесей в присутствии оксида свинца. Значительная часть радионуклидов и тяжелых металлов удерживается в расплаве, они растворяются и образуют комплексные нелетучие соединения. Наилучшие результаты дает использование расплавов карбонатов щелочных металлов. Расплав удерживает большую часть радионуклидов, включая просыпи отработавшего ядерного топлива.

Для совершенствования (уменьшение рабочей температуры переработки, замена оксида свинца первого класса опасности на оксиды меди и никеля второго класса опасности) и удешевления технологии переработки реакторного графита, исследовалась возможность применения комбинированного способа, а именно: переработка внешнего наиболее радиоактивного слоя графитовых блоков в оксидно-солевых расплавах и газогенераторная переработка менее радиоактивной внутренней части графитовых блоков с получением электрической энергии.

В качестве реакционной среды для окисления радиоактивного графита в расплаве были предложены следующие оксидно-солевые системы:  $\text{CuO} - \text{NaCl} - \text{KCl} - \text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{CuO} - \text{NaCl} - \text{KCl}$ ,  $\text{NiO} - \text{NaCl} - \text{KCl} - \text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NiO} - \text{NaCl} - \text{KCl}$ .

**Во второй главе** анализируются результаты термодинамического моделирования термических процессов при нагреве радиоактивного графита в различных системах в интервалах температур от 373 до 3273 К с целью установления состава конденсированной, газо-конденсированной и газовой фаз.

Расчет проводился для двух вариантов:

- нагревание реакторного графита в парах воды в диапазоне температур от 373 до 3273 К, моделирующее газогенераторную переработку графитовых блоков, а также аварийную ситуацию при разгоне реактора без его разрушения;
- нагревание реакторного графита в оксидно-солевых системах в различных атмосферах в интервале температур от 373 до 3273 К, моделирующее переработку внешнего наиболее радиоактивного слоя графитовых блоков.



На рисунках 1, 2 представлены результаты термодинамического моделирования нагрева реакторного графита в парах воды. Определена температура полного окисления углерода  $\sim 873$  К (предполагаемая температура переработки реакторного графита) как видно из рисунка 2, при нагревании до данной температуры хлор переходит в летучее состояние – хлороводород, цезий в газообразный хлорид цезия. В качестве окислителя углерода выступают пары воды с образованием газообразных  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ .

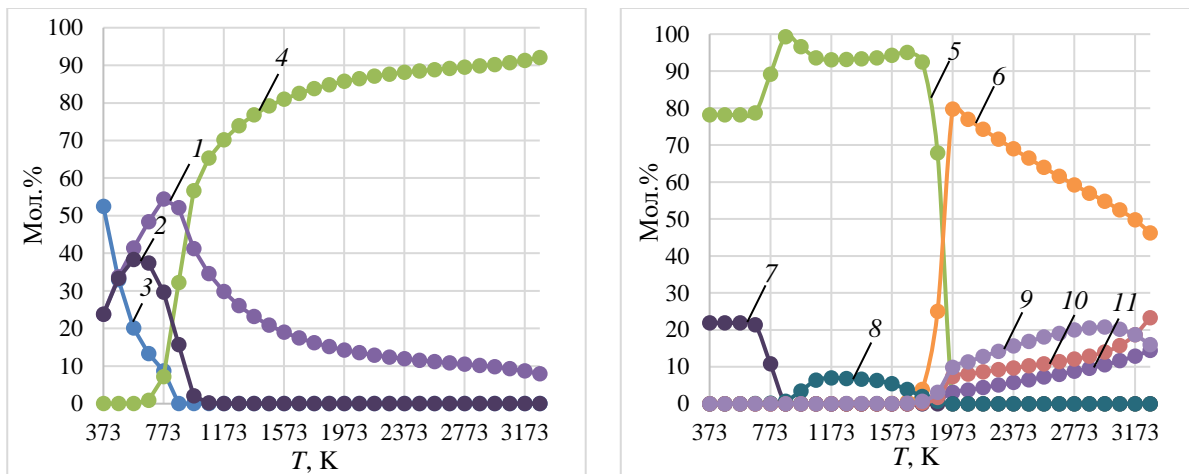


Рисунок 1 – Распределение углерода и урана по фазам:  
 1 –  $\text{CO}_{2(\text{r})}$ ; 2 –  $\text{CH}_{4(\text{r})}$ ; 3 –  $\text{C}_{(\text{к})}$ ; 4 –  $\text{CO}_{(\text{r})}$ ; 5 –  $\text{UO}_{2(\text{к})}$ ; 6 –  $\text{UO}_{3(\text{r})}$ ; 7 –  $\text{UO}_2\text{Cl}_{2(\text{к})}$ ;  
 8 –  $\text{CaUO}_4(\text{к})$ ; 9 –  $\text{UO}_3^-(\text{r})$ ; 10 –  $\text{UO}_2^+(\text{r})$ ; 11 –  $\text{UO}_2(\text{r})$ .

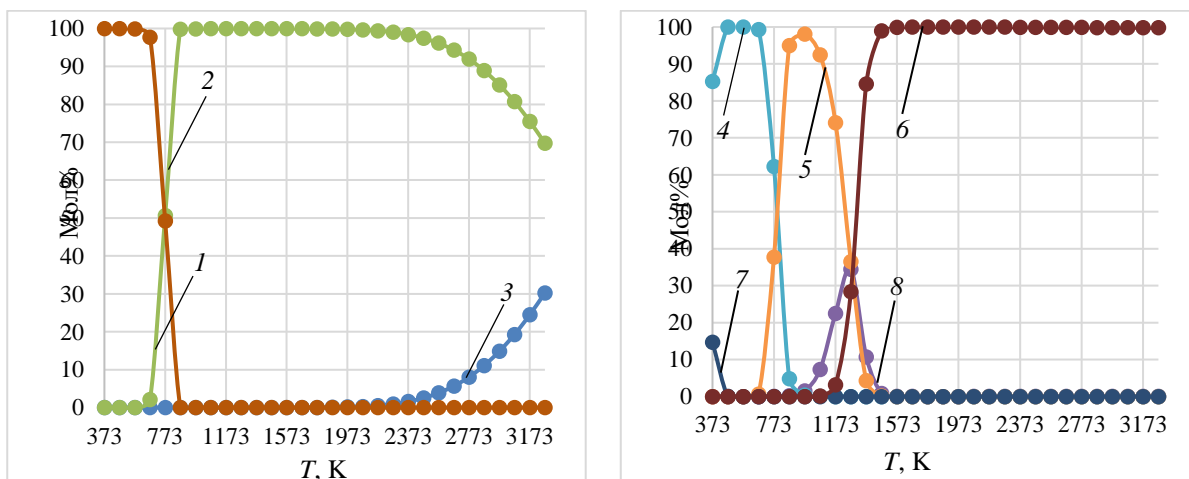


Рисунок 2 – Распределение хлора и цезия по фазам:  
 1 –  $\text{UO}_2\text{Cl}_{2(\text{к})}$ ; 2 –  $\text{HCl}_{(\text{r})}$ ; 3 –  $\text{Cl}_{(\text{r})}$ ; 4 –  $\text{CsCl}_{(\text{к})}$ ; 5 –  $\text{CsCl}_{(\text{r})}$ ; 6 –  $\text{Cs}^+(\text{r})$ ; 7 –  $\text{Cs}_2\text{CO}_{3(\text{к})}$ ;  
 8 –  $\text{CsOH}_{(\text{r})}$ .

Проведенное термодинамическое моделирование (система радиоактивный графит – пары воды) показало, что радионуклиды, исходно находящиеся в графитсодержащей системе в виде примесей, при нагреве склонны переходить в газовую фазу. Это может быть объяснено взаимодействием графита и оксидной конденсированной фазы с парами воды в исследованном диапазоне температур, что приводит к увеличению неустойчивости конденсированных фаз и переходу их компонентов в газовую фазу.

В соответствии с полученными данными, записаны протекающие химические реакции при нагревании рассматриваемой системы и рассчитаны

константы равновесия этих реакций.

Для определения более рациональных систем переработки реакторного графита с меньшим температурным режимом и меньшей токсичностью, в работе рассмотрены различные комбинации оксидно-солевых систем:  $\text{CuO} - \text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{K}_2\text{CO}_3 - \text{NaCl} - \text{KCl}$ ,  $\text{NiO} - \text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{K}_2\text{CO}_3 - \text{NaCl} - \text{KCl}$ ,  $\text{CuO} - \text{NaCl} - \text{KCl}$ ,  $\text{NiO} - \text{NaCl} - \text{KCl}$ .

Результаты термодинамического моделирования показывают, что:

- добавление оксидно-солевых систем позволяет снизить температуру окисления углерода на 300-400 К;
- переход радионуклида  $\text{Cl}$  в парообразный  $\text{HCl}$  происходит при больших температурах: для двойной системы солей – 1073 К; для четверной системы солей – 1673-2073 К;
- переход радионуклида  $\text{Cs}$  в парообразный  $\text{CsCl}$  происходит при больших температурах: для двойной системы солей – 873 К; для четверной системы солей – 973 К.

**В третьей главе** проведена серия экспериментов по взаимодействию смесей  $\text{CuO} - \text{C} - \text{NaCl} - \text{KCl} - \text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{CuO} - \text{C} - \text{NaCl} - \text{KCl}$ ,  $\text{NiO} - \text{C} - \text{NaCl} - \text{KCl} - \text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NiO} - \text{C} - \text{NaCl} - \text{KCl}$ .

Нагревание исследуемых веществ осуществляли в закрытой шахтной печи с вертикальной загрузкой при температуре от 373 до 1373 К, в атмосфере воздуха, при нормальном атмосферном давлении.

Принципиальная схема установки термического анализа изображена на рисунке 3. Установка состоит из нагревательной печи (1), измерительной ячейки (2), электрической цепи (3), контрольно-измерительного комплекса (4).

Контрольно-измерительный комплекс представляет собой две хромель-алюмелевые термопары, холодные спаи которых погружены в сосуд с тающим льдом и соединены с АЦП ZETLAB, горячий спай одной термопары погружен в тигель с исследуемым образцом, горячий спай второй термопары погружен в печное пространство.

Числовые значения ТЭДС регистрировали при помощи модуля ZET220 через равные промежутки времени (20 с). Значения температур определяли по ГОСТ Р 8.585-2001 «Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования» используя функцию «Тенденция» в программе Microsoft Excel.

Для повышения точности определения температур начала и окончания термических процессов строили термограммы в координатах  $\Delta T_{\text{ЭДС}}$  и времени нагрева ( $t$ , с), температуры ( $T$ , К) и времени нагрева ( $t$ , с).

Экзотермические и эндотермические эффекты определялись по точке начала отклонений от базовой линии до точки ее перегиба.

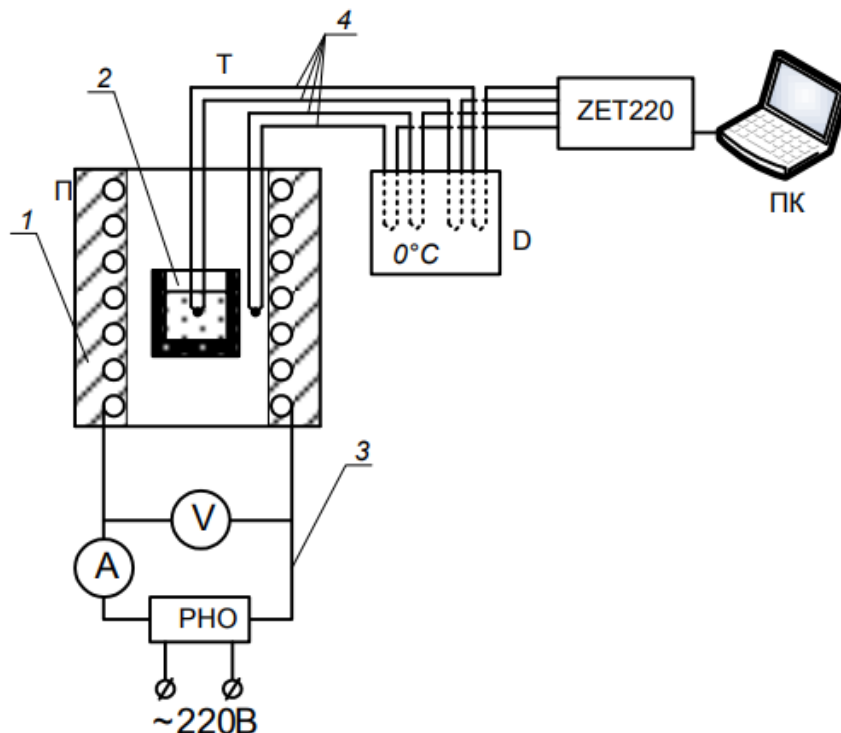


Рисунок 3 – Принципиальная электрическая схема установки термического анализа: А – амперметр для измерения силы тока в катушке нагревательной печи сопротивления (П), V – вольтметр для измерения напряжения, подаваемого с регулятора напряжения (PHO) на катушку нагревателя, ZET220 – аналого-цифровой и цифроаналоговый преобразователь сигнала для измерения ТЭДС холодных концов термопары, D – сосуд с тающим льдом, Т – термопары, ПК - персональный компьютер.

Первым слоем в корундовый тигель из алюмооксидной керамики засыпалась графит-оксидная смесь, вторым слоем засыпалась смесь солей. Чехол для термопары находился в тигле до их загрузки. После загрузки компонентов, тигель закрывался огнеупорной крышкой, термопара вставлялась в чехол. Затем на системе подвесов тигель помещался в нагревательную печь. Вторая термопара размещалась в пространстве печи.

Результаты практических экспериментов представлены на рисунках 4-6.

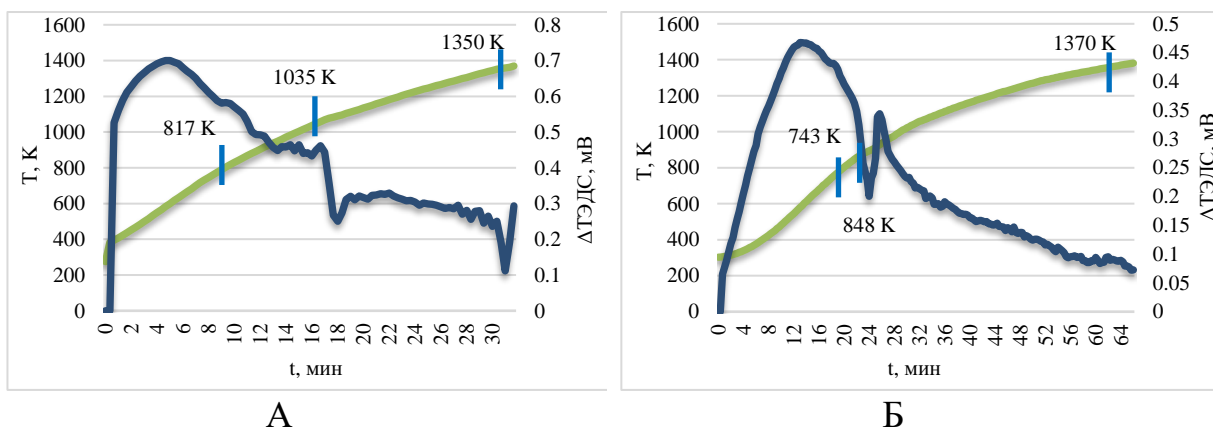


Рисунок 4 – Термограмма нагрева смеси: А) CuO – C; Б) CuO – C – NaCl – KCl – Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> – K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (зеленая линия – изменение температуры (K) от времени нагрева (мин); синяя линия – изменение ΔTЭДС (мВ) от времени нагрева (мин))

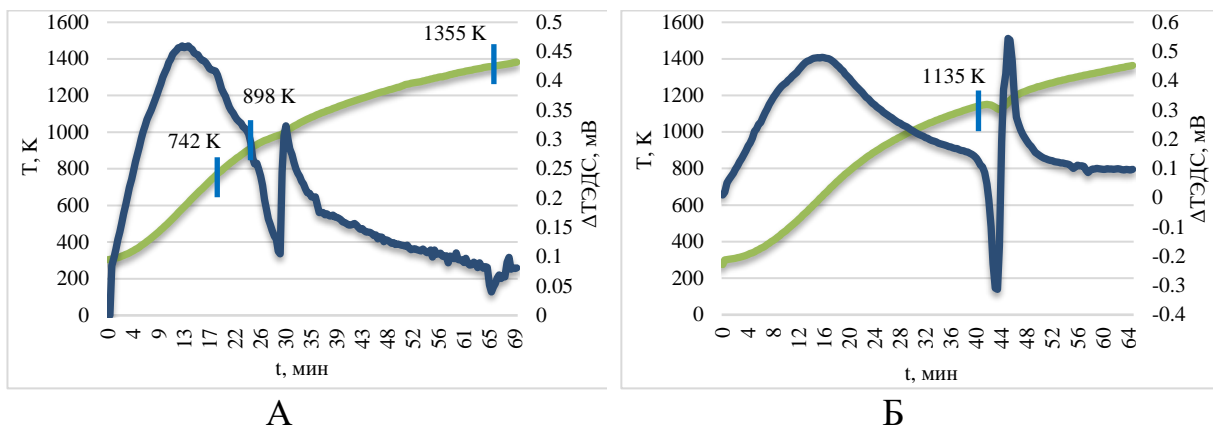


Рисунок 5 – Термограмма нагрева смеси: А)  $\text{CuO} - \text{C} - \text{NaCl} - \text{KCl}$ ; Б)  $\text{NiO} - \text{C}$   
(зеленая линия – изменение температуры (К) от времени нагрева (мин);  
синяя линия – изменение  $\Delta T_{\text{ЭДС}}$  (мВ) от времени нагрева (мин))

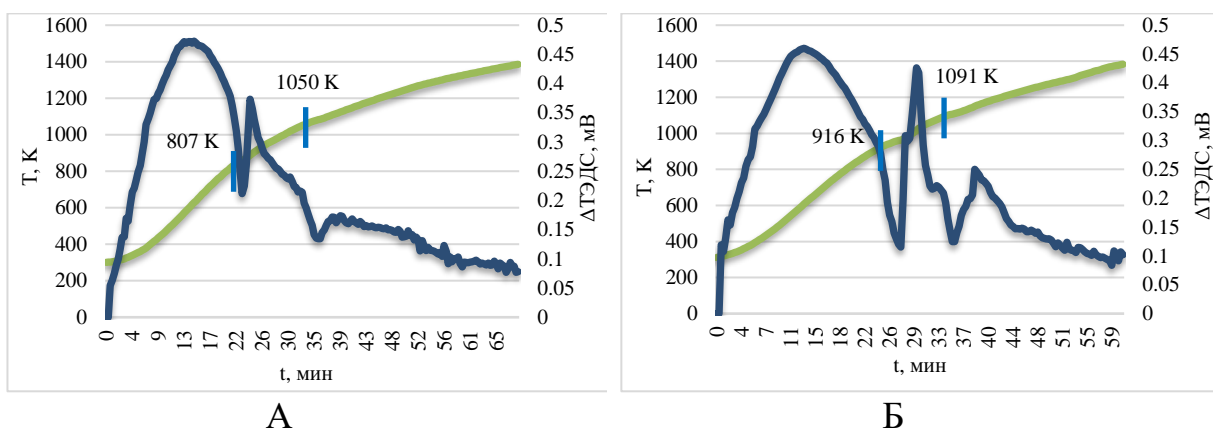


Рисунок 6 – Термограмма нагрева смеси: А)  $\text{NiO} - \text{C} - \text{NaCl} - \text{KCl} - \text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{K}_2\text{CO}_3$ ;  
Б)  $\text{NiO} - \text{C} - \text{NaCl} - \text{KCl}$ ; (зеленая линия – изменение температуры (К) от времени нагрева (мин);  
синяя линия – изменение  $\Delta T_{\text{ЭДС}}$  (мВ) от времени нагрева (мин))

На термограммах видно, что в системах, где присутствует оксид меди наблюдается три пика. А в системах с оксидом никеля на первом рисунке – один, а на двух последующих – два.

Проведенные статистические расчеты показывают, что результаты экспериментов укладываются в 95 % доверительный интервал. А также хорошо согласуются с данными других авторов.

Добавление двойной смеси солей к оксиду меди позволяет снизить температуру в среднем на 111 К, а четверной смеси солей на 174 К. Для оксида никеля при добавлении двойной системы солей температура уменьшается в среднем на 33 К, а четверной системы солей на 84 К, что благоприятно влияет на уменьшение температурного режима переработки реакторного графита в части меньшего уноса радионуклидов и меньшей энергозатратности.

На основании термограмм были определены значения энтальпий протекающих процессов.

**В четвертой главе** проведена серия экспериментов по исследованию окисления графита в системах  $\text{CuO} - \text{NaCl} - \text{KCl} - \text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{CuO} - \text{NaCl} - \text{KCl}$ ,  $\text{NiO} - \text{NaCl} - \text{KCl} - \text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NiO} - \text{NaCl} - \text{KCl}$  при помощи метода термогравиметрии. Эксперименты проводились в закрытой муфельной печи с горизонтальной загрузкой. Предметом исследования является графит ядерной

чистоты, измельченный механическим способом до размеров частиц не более 0,09 мм. К графиту в разных пропорциях добавлялись химически чистые оксиды меди и никеля, хлориды и карбонаты натрия и калия.

Результаты экспериментов представлены на рисунках 7-10.

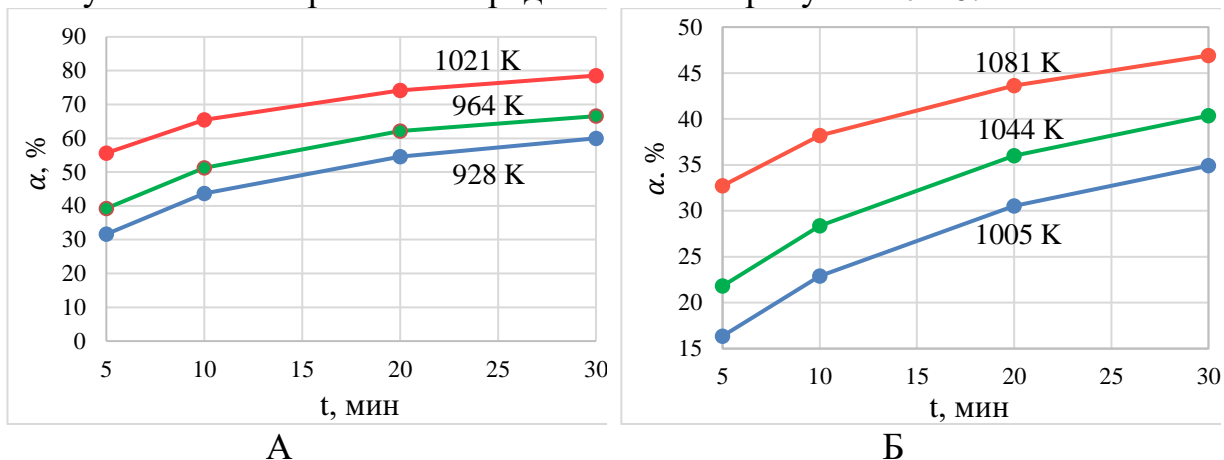


Рисунок 7 – Зависимость окисления графита от времени при разных температурах в системах:  
 А)  $\text{CuO} - \text{NaCl} - \text{KCl} - \text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{K}_2\text{CO}_3$ ;  
 Б)  $\text{CuO} - \text{NaCl} - \text{KCl}$

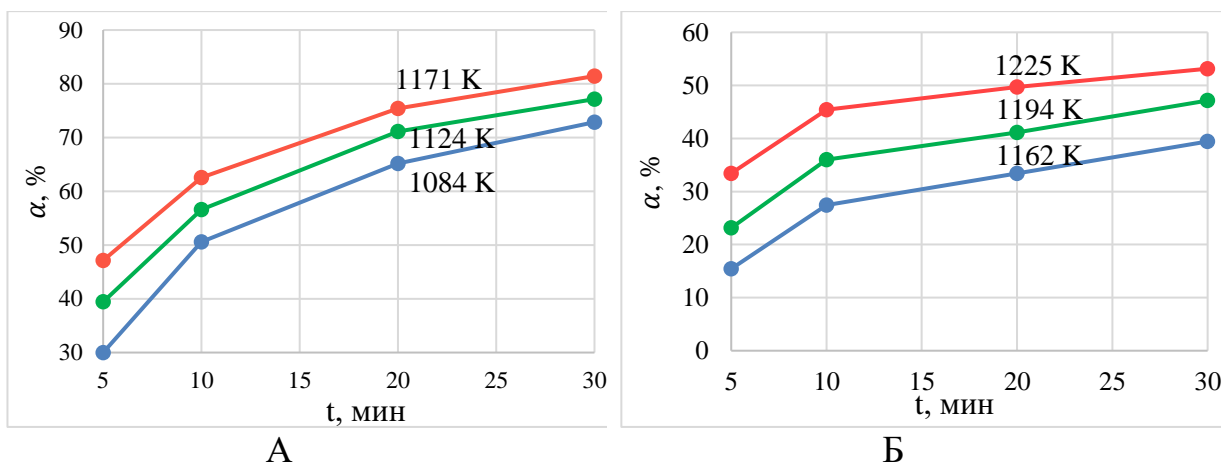


Рисунок 8 – Зависимость окисления графита от времени при разных температурах в системах:  
 А)  $\text{NiO} - \text{NaCl} - \text{KCl} - \text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{K}_2\text{CO}_3$ ;  
 Б)  $\text{NiO} - \text{NaCl} - \text{KCl}$

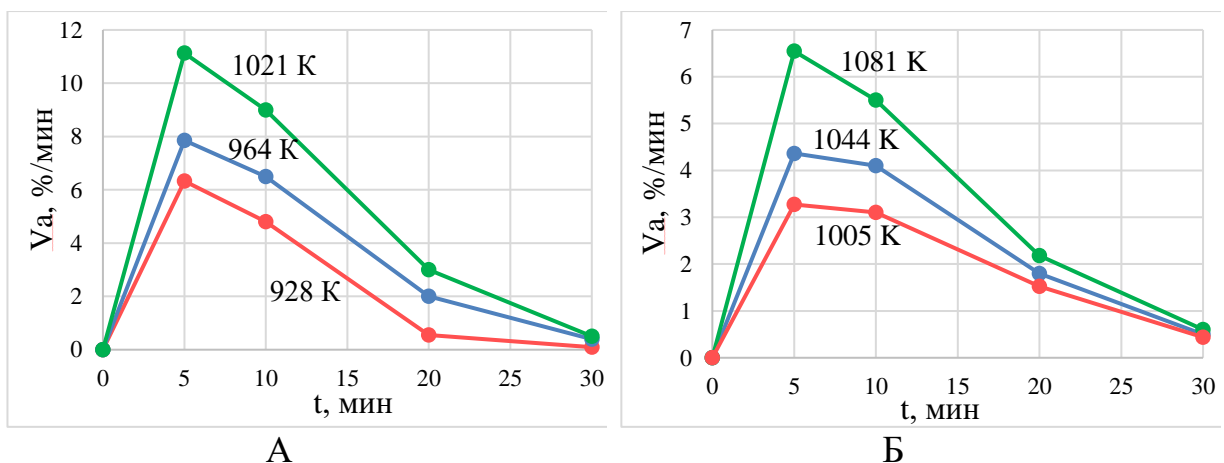


Рисунок 9 – Зависимость скорости окисления графита от времени при разных температурах в системах: А)  $\text{CuO} - \text{NaCl} - \text{KCl} - \text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{K}_2\text{CO}_3$ ;  
 Б)  $\text{CuO} - \text{NaCl} - \text{KCl}$

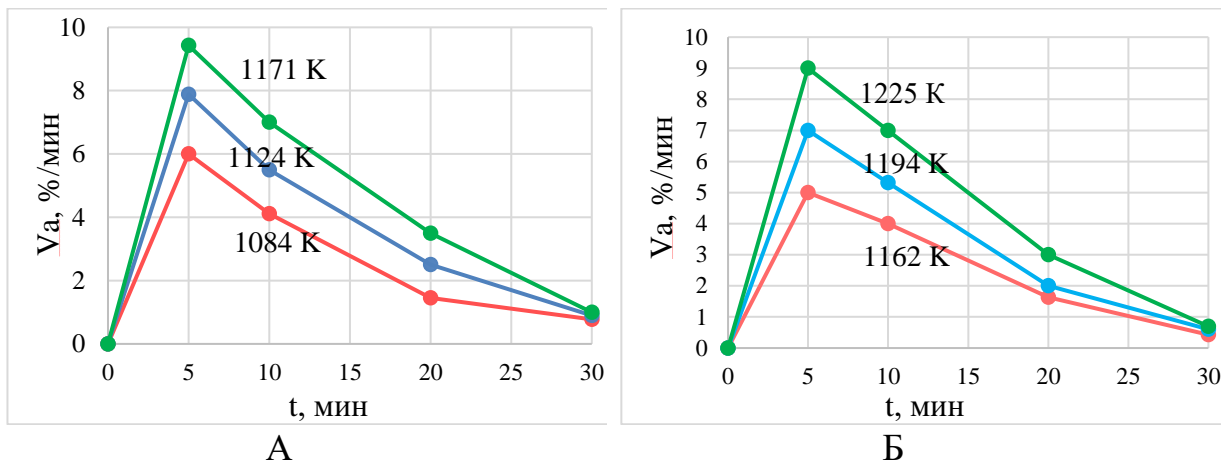


Рисунок 10 – Зависимость скорости окисления графита от времени при разных температурах в системах: А) NiO – NaCl – KCl – Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> – K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>; Б) NiO – NaCl – KCl

Термогравиметрическое исследование процесса окисления графита в оксидно-солевых системах показало, что при увеличении температуры системы и продолжительности ее нагрева, окисление графита увеличивается.

При температуре 1021 К наблюдается максимальное окисление графита для системы CuO – NaCl – KCl – Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> – K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.

При температуре 1171 К наблюдается максимальное окисление графита для системы NiO – NaCl – KCl – Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> – K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.

Окисление графита при добавлении четверной смеси солей для системы с оксидом меди на 3-4 % выше по сравнению с системой, где присутствует оксид никеля во временном интервале 5 – 10 минут.

Окисление графита при добавлении четверной смеси солей для системы с оксидом никеля на 2-3 % выше по сравнению с системой, где присутствует оксид меди во временном интервале 20-30 минут.

Взаимодействие оксидов меди и никеля с графитом проявляется наиболее интенсивно во временном интервале от 5 до 20 минут. При увеличении продолжительности нагрева систем до 30 минут прирост окисления составляет от 3 до 6 %. Таким образом продолжительность окисления графита должна составлять не более 30 минут.

Исследование механизма протекаемых реакций осуществлялось при помощи формально-кинетических моделей зависимости окисления от времени.

Проведенный анализ указанных выше процессов с использованием кинетических уравнений позволяет сделать вывод, что взаимодействие углерода с данными системами описывается уравнением замедляющего типа – трехмерной диффузией.

**В пятой главе** приведена технологическая схема переработки реакторного графита комбинированным способом, которая состоит из двух частей. Первая часть технологической схемы состоит из четырнадцати этапов (рисунок 11).



Рисунок 11 – Технологическая схема переработки реакторного графита комбинированным способом Ч.1

На рисунке 12 показана схема солевой установки по переработке реакторного графита.

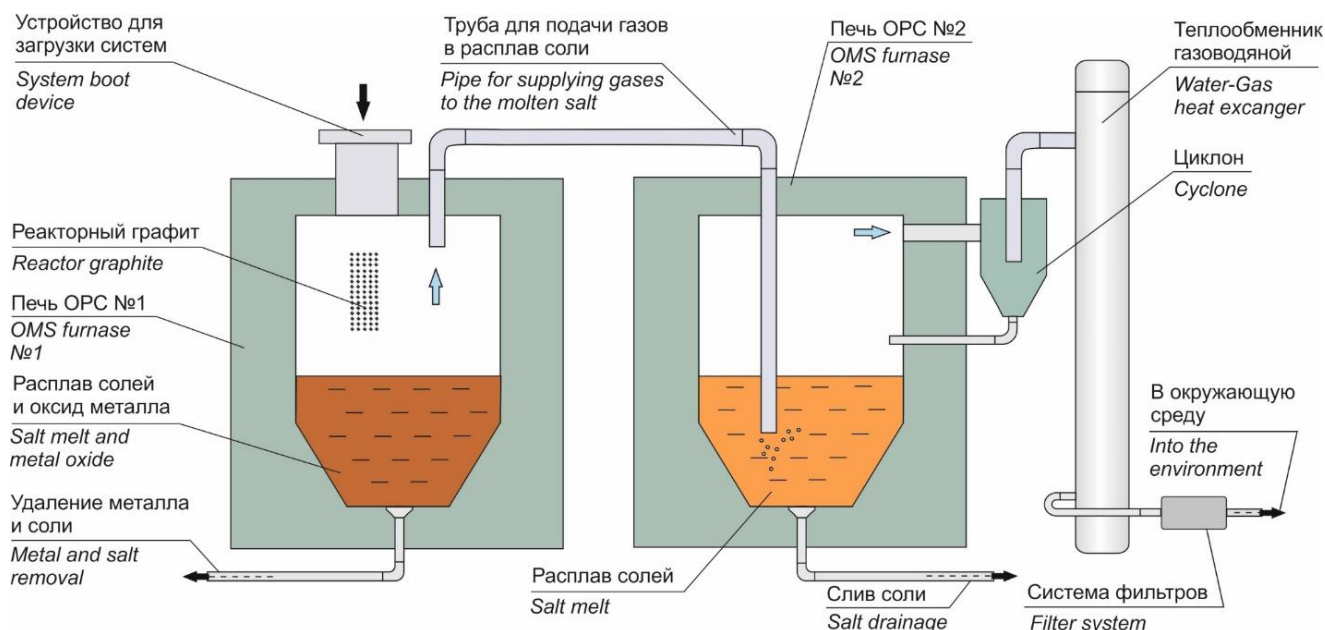


Рисунок 12 – Предлагаемая схема солевой установки по переработке реакторного графита

В качестве прототипа использовалась печь OPC. Установка состоит из двух печей: высокотемпературной печи №1 с максимальной температурой нагрева 900 °С, предназначенной для беспламенного сжигания реакторного

графита в оксидно-солевом расплаве; низкотемпературной печи №2 с максимальной температурой нагрева 550 °С, предназначенной для улавливания радиоактивных частиц отходящих газов из печи №1. Каждая печь состоит из корпуса, изготовленного из огнеупорного материала. Нагрев печей осуществляется при помощи электронагревателей (на схеме не показаны). В герметичную окислительную камеру печи №1 загружены графито-оксидная смесь и смесь солей. В герметичную камеру печи №2 загружена смесь солей. В нижней части печи №1 располагается система удаления металла и радиоактивных солей. В нижней части печи №2 располагается система слива солевой смеси с накопленными радионуклидами. В верхней части печи №1 находится система загрузки и газоотводная система. Выделяющиеся в окислительной камере печи №1 газы поступают в солевой расплав печи №2. Очищенные от радионуклидов газы поступают в циклон и в теплообменник, где охлаждаются и попадают на систему фильтрации. После системы фильтрации выбрасываются в атмосферу.

Вторая часть технологической схемы состоит из одиннадцати этапов (рисунок 13).



Рисунок 13 – Технологическая схема переработки реакторного графита комбинированным способом Ч.2

На рисунке 14 показана схема предлагаемой газогенераторной установки для переработки реакторного графита.



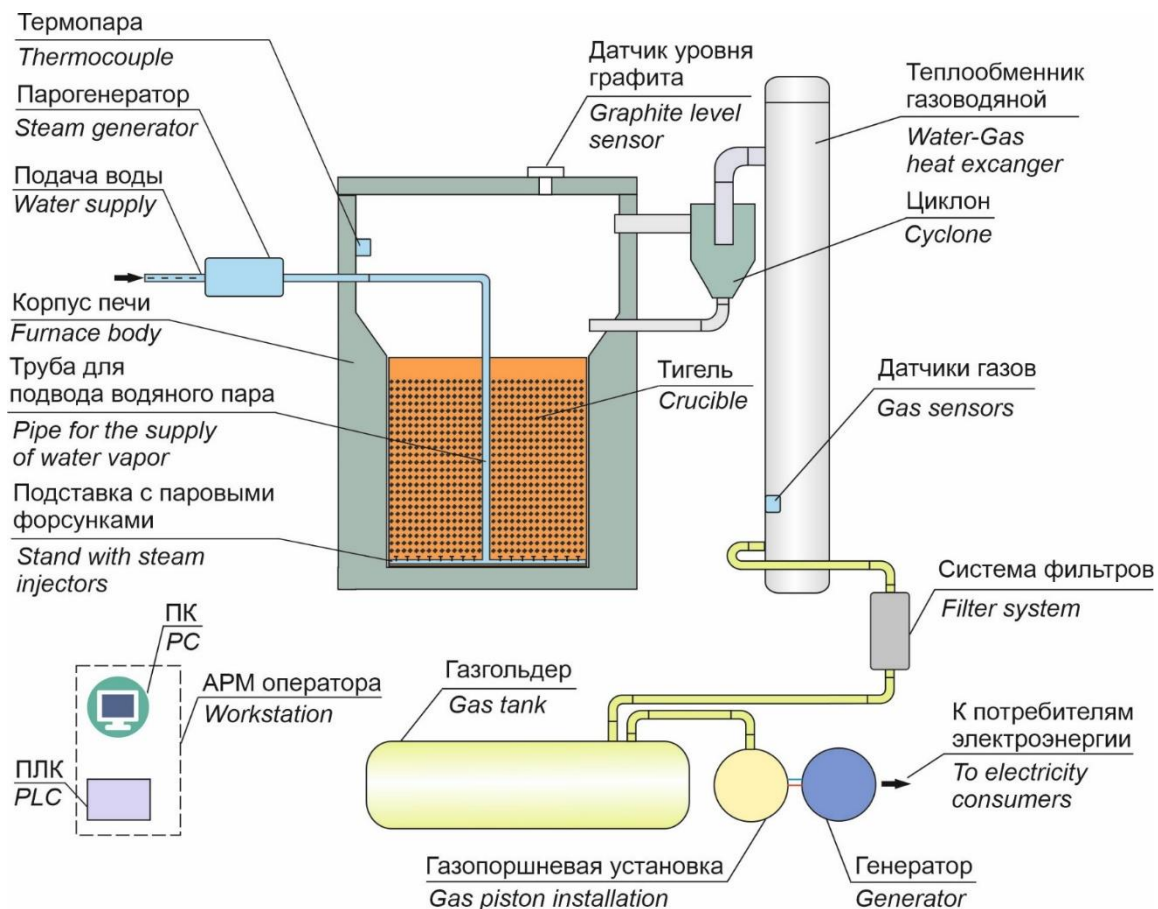


Рисунок 14 – Предлагаемая схема газогенераторной установки по переработке реакторного графита

В качестве прототипа использовался газогенератор с прямой схемой газификации сырья на основе электронагрева.

Газогенераторная печь состоит из корпуса, изготовленного из огнеупорного материала. В печь загружен тигель, на дне которого установлена труба с подставкой для подачи водяного пара и сверху засыпан измельченный реакторный графит. Труба подключена к парогенератору. Генераторный газ поступает на установку циклон и проходит через теплообменник, где охлаждается и попадает на систему фильтрации. После очистки генераторный газ попадает в газгольдер, где происходит его накопление и далее в газопоршневую установку, где происходит его сжигание и выработка электрической энергии, которая идет к потребителям.

В верхней части окислительной камеры устанавливается температурный датчик. В нижней части теплообменника установлены датчики контроля газов. Для контроля подачи водяного пара к парогенератору подключается задвижка с электроприводом. Нагрев печи осуществляется при помощи электрических нагревательных элементов (на схеме не показаны), которые расположены в окислительной камере. Перечисленное выше оборудование подключается к программируемому логическому контроллеру. ПЛК подключается к персональному компьютеру, на котором установлена компьютерная программа («ГРАФИТ-ГАЗ»).

Оператор с помощью компьютерной программы, управляет процессом

газогенераторной переработки реакторного графита.

Программное обеспечение «ГРАФИТ-ГАЗ» разработано в интегрированной среде разработки CODESYS (Controller Development System – инструментальный программный комплекс промышленной автоматизации).

На рисунке 15 изображено стартовое окно программы. На экране располагаются четыре кнопки: настройка АСР температуры, методические указания, справка, выход.

На рисунке 16 изображено окно настройки АСР (автоматическая система регулирования) температуры.

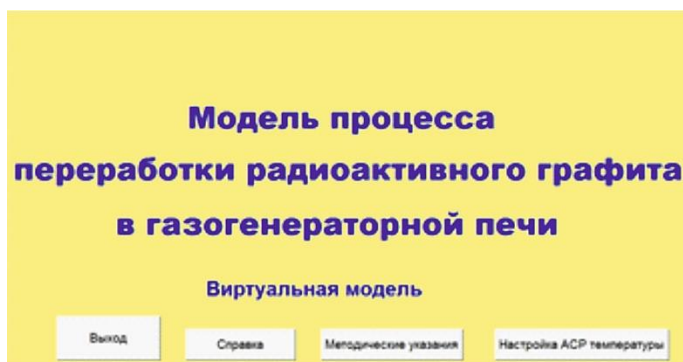


Рисунок 15 Стартовое окно программы



Рисунок 16 Окно настройки АСР программы

Рассчитана активность радиоактивного газа, образуемого при переработке предложенными способами. Показатели активности радиоактивного газа являются приемлемыми.

Рассчитано общее количество радиоактивных отходов, получаемых после переработки реакторного графита предложенными способами. Общее количество радиоактивных отходов (после переработки реакторного графита одного энергоблока РБМК для системы с оксидом меди), подлежащих захоронению составит 21,382 тонны что в 84 раза меньше по сравнению с исходной массой графита одного энергоблока РБМК. Общее количество радиоактивных отходов (после переработки реакторного графита одного энергоблока РБМК для системы с оксидом никеля), подлежащих захоронению составит 17,852 тонны что в 100 раз меньше по сравнению с исходной массой графита одного энергоблока РБМК. Общее количество радиоактивных отходов (после переработки реакторного графита одного энергоблока РБМК газогенераторным способом), подлежащих захоронению составит 0,25 тонны что в 7196 раз меньше по сравнению с исходной массой графита одного энергоблока РБМК.

Рассчитаны тепловые эффекты для реакций газогенерации.

Проведена технико-экономическая оценка производства электрической энергии газотурбинной и газопоршневой установками при использовании генераторного газа. Наиболее выгодной является газопоршневая установка.

Рассчитана общая стоимость выработанного электричества газогенераторной установкой при переработке реакторного графита одного энергоблока РБМК ~29 122 635 руб.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получены следующие научные и практические **результаты**:

- Методом термодинамического моделирования исследовано поведение радионуклидов при нагревании радиоактивного графита для следующих систем: реакторный графит – пары воды, реакторный графит – оксидно-солевые расплавы – пары воды (атмосфера воздуха, атмосфера аргона). Установлены основные химические реакции и произведен расчет констант равновесия для этих реакций;
- Методом термического анализа определены температурные интервалы взаимодействия оксидов и углерода в двойных и четверных солевых системах. Проведенные статистические расчеты показывают, что результаты экспериментов укладываются в 95 % доверительный интервал, а также хорошо согласуются с данными других авторов;
- Рассчитаны энтальпии эндотермических и экзотермических процессов, протекающих в системах (реакторный графит – оксидно-солевые расплавы);
- Термогравиметрическое исследование процесса окисления графита в оксидно-солевых системах показало, что при увеличении температуры системы и продолжительности ее нагрева, окисление графита увеличивается;
- Взаимодействие оксидов меди и никеля с углеродом проявляется наиболее интенсивно от 5 до 20 минут;
- При температуре 1021 К наблюдается максимальное окисление графита для системы  $\text{CuO} - \text{NaCl} - \text{KCl} - \text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{K}_2\text{CO}_3$ ;
- При температуре 1171 К наблюдается максимальное окисление графита для системы  $\text{NiO} - \text{NaCl} - \text{KCl} - \text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{K}_2\text{CO}_3$ ;
- При добавлении четверной системы солей, температурный интервал переработки для системы с оксидом меди снижается на  $\sim 72$  К, для системы с оксидом никеля на  $\sim 67$  К по сравнению с двойными системами;
- Окисление графита при добавлении четверной смеси солей для системы с оксидом меди на 3-4 % выше по сравнению с системой, где присутствует оксид никеля во временном интервале 5-10 минут;
- Окисление графита при добавлении четверной смеси солей для системы с оксидом никеля на 2-3 % выше по сравнению с системой, где присутствует оксид меди во временном интервале 20-30 минут;
- Наиболее рациональными системами для комбинированного способа переработки реакторного графита являются:
  - а) для способа окисления в расплаве солей (внешний наиболее радиоактивный слой реакторного графитового блока): система оксид меди – четверная смесь солей (с температурой переработки 1021 К);
  - б) для газогенераторного способа переработки (внутренняя часть реакторного графитового блока): пары воды (с рабочей температурой 873 К);
- Разработана технологическая схема переработки реакторного графита комбинированным способом в водяном паре и оксидно-солевых расплавах;

- Разработаны схемы солевой и газогенераторной установок для переработки реакторного графита;
- Рассчитана активность радиоактивного газа, образуемого при переработке предложенными способами. Показатели активности радиоактивного газа являются приемлемыми;
- Рассчитано общее количество радиоактивных отходов, получаемых после переработки реакторного графита предложенными способами. Общее количество радиоактивных отходов (после переработки реакторного графита одного энергоблока РБМК для системы с оксидом меди), подлежащих захоронению составит 21,382 тонны, что в 84 раза меньше по сравнению с исходной массой графита одного энергоблока РБМК. Общее количество радиоактивных отходов (после переработки реакторного графита одного энергоблока РБМК для системы с оксидом никеля), подлежащих захоронению составит 17,852 тонны, что в 100 раз меньше по сравнению с исходной массой графита одного энергоблока РБМК;
- Общее количество радиоактивных отходов (после переработки реакторного графита одного энергоблока РБМК газогенераторным способом), подлежащих захоронению составит 0,25 тонны, что в 7196 раз меньше по сравнению с исходной массой графита одного энергоблока РБМК;
- Разработана компьютерная программа «ГРАФИТ-ГАЗ» для управления процессом переработки радиоактивного графита в газогенераторной установке;
- Рассчитаны тепловые эффекты для реакций газогенерации;
- Проведена технико-экономическая оценка производства электрической энергии газотурбинной и газопоршневой установками при использовании генераторного газа;
- Для переработки генераторного газа предлагается использовать газопоршневую установку;
- Рассчитана общая стоимость выработанного электричества газогенераторной установкой при переработке реакторного графита одного энергоблока РБМК ~29 122 635 руб.

**Рекомендации.** Полученные в ходе исследования результаты могут быть использованы при подготовке студентов, изучающих методы переработки твердых радиоактивных отходов, а также для повышения квалификации персонала, работающего в области ядерной энергетики. Разработанный комбинированный способ переработки реакторного графита может значительно уменьшить его объемы, за счет применения оксидно-солевых расплавов и газогенераторной переработки.

**Перспективы дальнейшей разработки темы** состоят в разработке перспективных методов переработки радиоактивного графита.

## СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях,  
определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ:*

1. Барбин Н.М. Термодинамическое моделирование поведения радионуклидов при нагреве (сжигании) радиоактивного графита в парах воды. / Н.М. Барбин, **А.М. Кобелев**, Д.И. Терентьев, С.Г. Алексеев // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23. – №10 – С. 38-47. 0,63 п.л./ 0,32 п.л.
2. Барбин Н.М. Поведение углерода и урана при нагревании радиоактивного графита в парах воды. Термодинамическое моделирование. /Н.М. Барбин, **А.М. Кобелев**, Д.И. Терентьев, С.Г. Алексеев // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2016. – Т. 59. – Вып. 9 – С. 16-20. 0,31 п.л./ 0,16 п.л. (*Web of Science*).
3. Barbin N. M. Thermodynamic modeling of thermal processes involving actinides (U, Am, Pu) in the course of heating radioactive graphite in steam / N. M. Barbin, **A. M. Kobelev**, D. I. Terent'ev, S.G. Alekseev // Radiochemistry. – 2017. – Vol.59 – №5 – PP.507–511. 0,31 п.л./ 0,16 п.л. (*Scopus, Web of Science*).
4. Barbin N. Thermophysical characteristics of radioactive graphite – water vapor system / N. Barbin, **A. Kobelev**, D. Terent'ev, S. Alekseev // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 115. 0,25 п.л./ 0,13 п.л. (*Scopus*).
5. Barbin N. M. Thermodynamic Analysis of the Oxidation of Radioactive Graphite in a Multicomponent Melt in an Inert Atmosphere / N. M. Barbin, **A. M. Kobelev**, D. I. Terent'ev, S. G. Alekseev // Russian Metallurgy (Metally). – 2018. – Vol. 2018. – № 8 – PP.700–706. 0,44 п.л./ 0,22 п.л. (*Scopus, Web of Science*).
6. Barbin N. M. Thermodynamic modeling of thermal processes involving chlorine, calcium, beryllium, nickel, and cesium radionuclides in the course of heating radioactive graphite in steam / N. M. Barbin, **A. M. Kobelev**, D. I. Terent'ev, S.G. Alekseev // Radiochemistry. – 2019. – Vol.61 – №2 – PP.192–197. 0,38 п.л./ 0,19 п.л. (*Scopus, Web of Science*).
7. Barbin N. M. The behavior of radioactive metals (Am, Eu, Sr) during the processing of radioactive graphite in salt melts // N. M. Barbin, **A. M. Kobelev**, D. I. Terent'ev, S.G. Alekseev // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – v. 1347. 0,38 п.л./ 0,19 п.л. (*Scopus*).
8. Barbin N. M. Thermodynamic analysis of the oxidation of radioactive graphite in the CuO–NaCl–KCl–Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>–K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> melt in water vapor / N. M. Barbin, **A. M. Kobelev**, D. I. Terent'ev, S.G. Alekseev // Russian Metallurgy (Metally). – 2020. – Vol. 2020. – №2 – PP.155–163. 0,56 п.л./ 0,28 п.л. (*Scopus, Web of Science*).
9. Barbin N. Thermal characteristics of the radioactive graphite – CuO – Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> – K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> – NaCl – KCl system in argon atmosphere / N. Barbin, **A. Kobelev**, D.

Terent'ev, S. Alekseev // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1565. 0,31 п.л./ 0,16 п.л. (*Scopus*).

10. Barbin N. M. Thermodynamic modeling of the gas-plasma phase in the processing of radioactive graphite in a gas plasma furnace / N. M. Barbin, **A. M. Kobelev**, D. I. Terent'ev // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1675. 0,38 п.л./ 0,19 п.л. (*Scopus*).

### Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

11. **Кобелев А.М.** Св-во о гос. рег. прог. для ЭВМ № 2019667735. Модель процесса переработки радиоактивного графита в газогенераторной печи / **А.М. Кобелев**, В.В. Луговкин, Н.М. Барбин, Д.И. Терентьев: патентообладатель ФГБОУ ВО Уральский институт ГПС МЧС России – №2019666648; заявл. 18.12.2019; опубл. 26.12.2019.

### Публикации в других научных изданиях:

12. **Кобелев А.М.** Термодинамическое моделирование поведения урана, плутония и америция при горении радиоактивного графита в парах воды / **А.М. Кобелев**, Д.И. Терентьев, Н.М. Барбин, И.Д. Опарин // Техносферная безопасность. – 2014. – №1(2) – С.34–39. 0,38 п.л./ 0,19 п.л.
13. **Кобелев А.М.** Расчет теплофизических свойств системы радиоактивный графит-пары воды при нагревании / **А.М. Кобелев**, Д.И. Терентьев, Н.М. Барбин, С.Г. Алексеев // Всероссийская конференция XXXI «Сибирский теплофизический семинар»: сборник тезисов – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2014. – С. 203 – 204. 0,13 п.л./ 0,06 п.л.
14. **Кобелев А.М.** Сравнительный термодинамический анализ поведения урана, плутония и америция при нагревании радиоактивного графита в атмосфере углекислого газа или в парах воды / **А.М. Кобелев**, И.А. Сидаш, Н.М. Барбин, И.Д. Опарин // Международная научно-практическая конференция «Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло» прошлое, современное состояние, будущее: сборник докладов международной научно-практической конференции – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – С. 276 – 282. 0,44 п.л./ 0,22 п.л.
15. **Кобелев А.М.** Расчет теплофизических свойств при нагревании системы радиоактивный графит-пары воды / **А.М. Кобелев**, Н.М. Барбин, Д.И. Терентьев, С.Г. Алексеев // Всероссийская конференция XXXI «Сибирский теплофизический семинар»: сборник докладов – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2014. – С. 525 – 527. 0,19 п.л./ 0,09 п.л.
16. **Кобелев А.М.** Автоматизация исследования процесса переработки радиоактивного графита при помощи контрольно-измерительного комплекса / **А.М. Кобелев**, И.А. Сидаш, Н.М. Барбин, А.А. Бородин, А.В. Пешков // Техносферная безопасность. – 2015. – №1(6) – С.27–31. 0,31 п.л./ 0,16 п.л.

17. Барбин Н.М. Термодинамическое моделирование поведения Pu и Am при нагреве радиоактивного графита в парах воды / Н.М. Барбин, **А.М. Кобелев**, Д.И. Терентьев, С.Г. Алексеев // Радиационная и промышленная экология: Материалы Всероссийского семинара с международным участием – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2016. – С. 331 – 334. 0,25 п.л./ 0,13 п.л.
18. Барбин Н.М. Термодинамическое моделирование поведения углерода и урана при нагревании радиоактивного графита в парах воды / Н.М. Барбин, **А.М. Кобелев**, Д.И. Терентьев, С.Г. Алексеев // 10-я Международная конференция «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технологии»: сборник тезисов докладов – М.: Углеродное общество, 2016. – С. 62 – 65. 0,25 п.л./ 0,13 п.л.
19. Барбин Н.М. Термодинамический анализ поведения U и Pu при нагреве радиоактивного графита в парах воды / Н.М. Барбин, **А.М. Кобелев**, Д.И. Терентьев, С.Г. Алексеев // XI Международное Курнаковское совещание по физико-химическому анализу в рамках XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: сборник тезисов докладов – Воронеж, 2016. – С. 63 – 66. 0,25 п.л./ 0,13 п.л.
20. **Кобелев А.М.** Термодинамическое моделирование поведения радионуклидов Eu, U при нагревании радиоактивного графита в парах воды / **А.М. Кобелев**, Н.М. Барбин, Д.И. Терентьев, С.Г. Алексеев // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека (Материалы V международной конференции): сборник докладов – Томск: Томский политехнический университет, 2016. – С. 308 – 311. 0,25 п.л./ 0,13 п.л.
21. Барбин Н.М. Термодинамическое моделирование нагревания радиоактивного графита в атмосфере пара / Н.М. Барбин, **А.М. Кобелев**, Д.И. Терентьев, С.Г. Алексеев // Сборник трудов Всероссийской конференции «Химия твердого тела и функциональные материалы – 2016» (Сателлит XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии): сборник трудов конференции – Екатеринбург, 2016. – С. 160 – 162. 0,19 п.л./ 0,09 п.л.
22. Барбин Н.М. Теплофизические характеристики системы радиоактивный графит-водяной пар / Н.М. Барбин, **А.М. Кобелев**, Д.И. Терентьев, С.Г. Алексеев // Тезисы докладов Всероссийской конференции «XXXIII Сибирский теплофизический семинар»: сборник докладов – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2017. – С. 149 – 150. 0,13 п.л./ 0,06 п.л.
23. Барбин Н.М. Термодинамическое моделирование термических процессов с участием Sr при нагреве радиоактивного графита в парах воды / Н.М. Барбин, **А.М. Кобелев**, Д.И. Терентьев, С.Г. Алексеев // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2018: сборник статей Международной научно-практической конференции – Севастополь: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2018. – С. 127 – 131. 0,31 п.л./ 0,16 п.л.
24. Барбин Н.М. Теплофизические характеристики системы радиоактивный

- графит  $\text{CuO} - \text{NaCl} - \text{KCl} - \text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{K}_2\text{CO}_3$  / Н.М. Барбин, **А.М. Кобелев**, Д.И. Терентьев, С.Г. Алексеев // Семинар вузов по теплофизике и энергетике: сборник материалов Всероссийской научной конференции с международным участием «семинар вузов по теплофизике и энергетике». – Санкт-Петербург; Издательство Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». – 2019. – С. 52 – 53. 0,13 п.л./ 0,06 п.л.
25. Барбин Н.М. Термодинамический анализ окисления радиоактивного графита в расплаве  $\text{NiO} - \text{NaCl} - \text{KCl} - \text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{K}_2\text{CO}_3$  / Н.М. Барбин, **А.М. Кобелев**, Д.И. Терентьев, С.Г. Алексеев // Труды конгресса с международным участием и конференции молодых ученых «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований» («ТЕХНОГЕН–2019»): труды конгресса – Екатеринбург: ИМЕТ УрОРАН, 2019. – С. 554 – 558. 0,31 п.л./0,16 п.л.
26. Барбин Н.М. Газогенераторная переработка реакторного графита / Н.М. Барбин, **А.М. Кобелев**, Д.И. Терентьев, С.Г. Алексеев // Труды научно-практической конференции с международным участием и элементами школы молодых ученых «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР». – Екатеринбург.; УрОРАН. – 2020. – С. 463 – 466. 0,25 п.л./0,13 п.л.
27. Барбин Н.М. Переработка радиоактивного графита газогенераторным способом / Н.М. Барбин, **А.М. Кобелев**, Д.И. Терентьев, С.Г. Алексеев // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 75-летию Победы в Великой Отечественной войне (3-7 июня 2020 г.) в 2-х ч. / ред. колл. А. Ю. Акулов [и др.]. – Екатеринбург.; Уральский институт ГПС МЧС России, 2020. Ч.1. – 2020. – С. 15 – 20. 0,38 п.л./0,19 п.л.