

Кобелева Антона Михайловича «КОМБИНИРОВАННЫЙ СПОСОБ ПЕРЕРАБОТКИ РЕАКТОРНОГО ГРАФИТА В ВОДЯНОМ ПАРЕ И ОКСИДНО-СОЛЕВЫХ РАСПЛАВАХ»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

На отзыв представлена диссертационная работа, состоящая из введения, пяти глав, заключения, списка основных обозначений, списка литературы, одиннадцати приложений.

### 1. Актуальность темы диссертации

Вопрос вывода из эксплуатации ядерных установок с уран-графитовыми реакторами (УГР) представляет собой комплекс проблем, связанных с необходимостью выбора оптимальных способов обращения с накопленными радиоактивными отходами. Среди накопленных радиоактивных отходов графит занимает особое место. В настоящий момент в мире не существует окончательного решения по проблеме обращения с графитом. Одним из возможных решений данной проблемы является его окисление с целью снижения объема отходов. Существуют разные способы окисления графита, среди которых метод беспламенного окисления в расплавленных солях обладает рядом преимуществ.

Достоинством способа беспламенного окисления в расплавленных солях является удержание значительной части радионуклидов в расплаве. К недостаткам способа относится высокая температура процесса (до 900 °С), а также применение таких тяжелых металлов как свинец.

Таким образом, задача оптимизации способа беспламенного окисления графита в расплавленных солях с целью снижения температуры процесса и применения менее токсичных материалов является актуальной.

### 2. Анализ содержания диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка, включающего 132 наименования, 11 приложений и содержит 264 страницы.

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

*В первой главе* приведен обзор и анализ литературных данных по известным способам переработки реакторного графита. Выявлены недостатки существующих способов. Показана актуальность разработки новых способов, свободных от существующих недостатков.

*Во второй главе* проведен термодинамический анализ поведения реакторного графита в четырех оксидно-солевых системах:  $\text{CuO} - \text{NaCl} - \text{KCl} - \text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{CuO} - \text{NaCl} - \text{KCl}$ ,  $\text{NiO} - \text{NaCl} - \text{KCl} - \text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NiO} - \text{NaCl} - \text{KCl}$  и в водяном паре. Методом термодинамического расчета определен состав конденсированной и газовой фаз. Описаны протекающие химические реакции при нагревании реакторного графита в рассматриваемых системах и рассчитаны их константы равновесия. Определено, что добавление оксидно-солевых систем позволяет снизить температуру окисления реакторного графита.

*В третьей главе* проведен анализ работ по восстановлению оксидов металлов углеродом. Проведено термическое исследование взаимодействия реакторного графита с оксидами металлов и солевыми расплавами. Определены значения температур переработки реакторного графита для каждой из систем.

В четвертой главе проведен анализ работ по кинетике восстановления оксидов металлов углеродом. Проведено термогравиметрическое исследование процесса окисления графита в рассматриваемых оксидно-солевых системах.

В пятой главе описана предлагаемая технологическая схема переработки реакторного графита комбинированным способом. Приведены схемы установок для переработки графита. Проведена оценка активности газообразных продуктов переработки графита комбинированным способом. Расчетным методом определено количество отходов, получаемых после переработки реакторного графита комбинированным способом. Приведено описание компьютерной программы «ГРАФИТ-ГАЗ», разработанной в среде разработки CODESYS. Произведена оценка стоимости выработанного электричества газогенераторной установкой.

В заключении сформулированы выводы по диссертации.

### **3. Соответствие диссертации паспорту специальности 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации**

Содержание диссертации соответствует следующим пунктам области исследования паспорта научной специальности 05.14.03:

П. 1 Моделирование нейтронно-физических, химических, тепловых, гидравлических и механических процессов, создание программных комплексов, обеспечивающих расчетное обоснование облика и безопасного функционирования объектов ядерной энергетики.

П. 3 Разработка методов расчета технологических процессов в объектах ядерной энергетики с целью оптимизации их характеристик, повышения надежности оборудования и систем.

П. 6 Разработка методов обоснования безопасности и экологической приемлемости технологий и объектов ядерной энергетики.

### **4. Методы исследования**

Для решения задач исследования использовался анализ и обобщение данных научно-технической литературы. Моделирование процесса переработки реакторного графита проводилось с использованием программного комплекса TERRA. Термическое исследование взаимодействия реакторного графита с оксидами металлов и соевыми расплавами проводилось в нагревательной печи шахтного типа с использованием измерительного комплекса (аналого-цифровой преобразователя ZET220, персонального компьютера, хромель-алюмелевый термодатчик, лабораторных весов METLERTOLEDO). Термогравиметрическое исследование процесса окисления графита в рассматриваемых оксидно-солевых системах проводилось в закрытой муфельной печи с горизонтальной загрузкой SNOL 30/1100.

### **5. Степень обоснованности положений и достоверности полученных результатов**

Достоверность приведенных в работе результатов, обоснованность положений и выводов подтверждается корректностью постановки задач и принятых приближений, использованием надежных методов моделирования, хорошо зарекомендовавших себя для решения задач подобного класса. Полученные результаты в целом не противоречат исследованиям, выполненным другими авторами и применяемым на практике.

Таким образом, достоверность результатов и выводов диссертационного исследования обоснованы в достаточной степени и подтверждается успешной апробацией полученных автором

результатов на следующих научных 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.

## **6. Научная новизна исследования**

Диссертантом 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 (атмосфера воздуха, атмосфера аргона),  $\text{CuO} - \text{C} - \text{NaCl} - \text{KCl} - \text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{K}_2\text{CO}_3$  ( $\text{CuO} - \text{C} - \text{NaCl} - \text{KCl}$ ,  $\text{NiO} - \text{C} - \text{NaCl} - \text{KCl} - \text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NiO} - \text{C} - \text{NaCl} - \text{KCl}$ ) – 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.

## **7. Теоретическая и практическая значимость и использование результатов диссертационной работы**

Теоретическая и практическая значимость работы определена следующим:

- Диссертантом определен равновесный состав систем реакторный графит – пары воды, реакторный графит – оксидно-солевые расплавы – пары воды (атмосфера воздуха, атмосфера аргона);

- Проведен комплекс экспериментальных исследований: термический термогравиметрический анализ взаимодействия реакторного графита с оксидно-солевыми расплавами;
- Разработан комбинированный способ переработки реакторного графита;
- Предложены принципиальные конструкции установок по переработке реакторного графита;
- Разработана компьютерная программа «Модель процесса переработки радиоактивного графита в газогенераторной печи (ГРАФИТ-ГАЗ)»;
- Разработанная компьютерная программа внедрена в учебный процесс при подготовке специалистов направления «Пожарная безопасность» в Уральском институте ГПС МЧС России;
- Основные научные положения диссертационного исследования могут пополнить справочные данные.

## 8. Личный вклад автора

Основные результаты, представленные в диссертационной работе, получены лично автором работы или при его участии.

## 9. Публикация основных результатов работы

По материалам диссертационной работы опубликовано 27 научных работ, в том числе 9 статей в изданиях, индексируемых в международных системах цитирования Web of Science и Scopus.

## 10. Замечания

- 1) В диссертации и автореферате не отражен личный вклад автора.
- 2) В диссертации на стр. 17 в Таблице 1.2 Активность образцов графита из активной зоны реактора АМБ-100 для ячейки 18-22 приведена активность  $5,6 \cdot 10^{-2}$  Ки/см<sup>3</sup> для Cs-134, что на 4 порядка выше, чем для Cs-137 и является вероятно опечаткой.
- 3) В диссертации на стр.124 при описании технологической схемы переработки реакторного графита отсутствует описание обращения с газообразными продуктами окисления такими как C-14, Cl-36 и H-3.
- 4) На этой же странице указывается, что солевая смесь с накопленными радионуклидами удаляется через сливную систему печи при условии, что масса радионуклидов  $\geq 10\%$  от массы солей. Данный показатель вызывает сомнения поскольку содержание радионуклидов из-за их высокой удельной активности, скорее всего, не превысит 0,01 %.
- 5) Далее там же (на стр.124) указано, что для хранения радиоактивных отходов применяют контейнеры, изготовленные из железобетона, стали, свинца или полиэтилена, обогащенного бромом, что является, по-видимому, опечаткой т.к. имеется в виду бор.
- 6) Далее там же (на стр.124) указано, что радиоактивные отходы перевозят для захоронения в специальных могильниках, где слово могильники относится к устаревшей терминологии, т.к. в настоящее время принято название - пункт захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО).
- 7) В диссертации приводится краткое описание обращения с солевой фракцией отходов, но не приводится обращение с отходами от очистки парогазовой фазы, которые будут содержать радионуклиды C-14, Cl-36 и H-3.
- 8) Из диссертации не понятно, каким образом осуществлялся выбор оксидов металлов и почему выбор был остановлен на оксидах меди и никеля?

Впрочем, указанные замечания не носят принципиального характера и не меняют общей положительной оценки работы.

Автореферат по своему содержанию и выводам соответствует диссертации.

## 11. Соответствие диссертации критериям Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ

Диссертационная работа Кобелева А. М. в полном объеме отвечает критериям, которые установлены Положением о присуждении ученых степеней в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

В диссертационной работе представлены научно-обоснованные решения, внедрение которых имеет важное значение для объектов атомной энергетики.

## 12. Общее заключение

Обобщая вышесказанное, считаю, что диссертационная работа «Комбинированный способ переработки реакторного графита в водяном паре и оксидно-солевых расплавах» является законченной научно-квалификационной работой, обладает актуальностью, содержит значимые для отрасли научные и практические результаты.

Диссертационная работа полностью отвечает требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, а соискатель, Кобелев Антон Михайлович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации.

Официальный оппонент,  
Начальник группы по обращению  
с жидкими и газоаэрозольными радиоактивными  
отходами центральной заводской лаборатории (ЦЗЛ),  
кандидат технических наук

Слончев Олег Михайлович  
« 08 » август 2021 г.

Сведения:

**Полное наименование организации:**

Федеральное государственное унитарное предприятие «Производственное объединение «МАЯК»

**Юридический адрес:** Россия, 456784, Челябинская обл., г. Озерск, пр. Ленина, д.31

**Телефон:** +7 (35130) 3-70-11, 3-31-05

**Факс:** +7 (35130) 3-38-26

**Электронный адрес:** [mayak@po-mayak.ru](mailto:mayak@po-mayak.ru)

Подпись Слончева О. М. заверяю