

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора химических наук, старшего научного сотрудника, заместителя директора - директора направления радиохимии частного учреждения «Наука и инновации» Шадрина Андрея Юрьевича на диссертационную работу Легких Кристины Геннадьевны «Обоснование применения пирохимической и газофазной технологий переработки радиоактивных щелочных жидкометаллических теплоносителей (натрий, натрий-калий) для решения практических задач при выводе из эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность

Развитие реакторов на быстрых нейтронах обусловлено стремлением многих стран перейти к замкнутому топливному циклу, что является приоритетным направлением развития Госкорпорации «Росатом». На сегодняшний день России принадлежит технологический приоритет в разработке реакторов на быстрых нейтронах и их эксплуатации. Успешно эксплуатируются АЭС с реакторами на быстрых нейтронах, охлаждаемыми щелочным теплоносителем (БН-600, БН-800). Нормы и правила в области использования атомной энергии требуют предусмотреть порядок и меры по обеспечению вывода из эксплуатации ядерных установок, поэтому разработка методов утилизации щелочных жидкометаллических теплоносителей (ЩЖМТ), несомненно, является **актуальной**. Диссертационная работа Легких К.Г. посвящена разработке методов иммобилизации отработавшего щелочного теплоносителя

Цель диссертационной работы Легких К.Г. – обоснование эффективности и безопасности применения пирохимической и газофазной технологий переработки радиоактивных щелочных жидкометаллических теплоносителей на примере научно-технического полигона ИР БР-10.

Научная новизна заключается в том, что разработан и экспериментально проверен способ переработки отработавшего ЩЖМТ, загрязненного ртутью, с локализацией выделяющейся ртути; разработан способ газофазного окисления недренируемых остатков ЩЖМТ; впервые получены экспериментальные данные о скорости выщелачивания ^{137}Cs из образцов продуктов твердофазного окисления отработавшего ЩЖМТ.

Практическая значимость работы определена тем, что на основании исследований модернизирован стенд МАГМА-ТФО и кондиционирован

радиоактивный сплав натрий-калий-ртуть; разработанный способ нейтрализации недренируемых остатков ЩЖМТ во внутриреакторном оборудовании применен на площадке исследовательского реактора БР- 10.

Научные положения, выводы и рекомендации Легких К.Г. являются обоснованными, о чем свидетельствуют результаты экспериментальных проверок разработанных способов (твердофазного окисления для переработки радиоактивного сплава натрий-калий-ртуть и нейтрализации недренируемых остатков ЩЖМТ) на исследовательском реакторе БР-10.

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается применением стандартных методик анализа, воспроизводимостью результатов исследований, использованием средств измерений с известными метрологическими характеристиками.

Диссертация содержит введение, пять глав, с выводами по каждой главе, заключение и список цитируемой литературы, состоящий из 55 наименований. Работа изложена на 109 страницах машинописного текста, включает 45 рисунков и 11 таблиц.

В первой главе приведена информация об объемах и составах радиоактивных отходов (РАО) ЩЖМТ, накопленных при эксплуатации исследовательского реактора БР-10. Показано, что к таким РАО относятся отработавший ЩЖМТ первого и второго контура реактора, сплав натрий-калий с примесью ртути (до 7,5 % мас.), щелочной металл в сливных баках 1-ой и 2-ой петлях второго контура, транспортных емкостях натрия, экспериментальных устройствах, пеналах хранения отработавших тепловыделяющих сборок, отработавших холодных ловушках оксидов первого и второго контуров и др. (всего 18–19 м³ отходов ЩЖМТ). Проанализированы методы иммобилизации отработавшего ЩЖМТ. К основным методам кондиционирования ЩЖМТ отнесены растворение в органических растворителях, распыление щелочного металла в атмосферу закиси азота, твердофазное окисление шлаком медеплавильного производства (ТФО), растворение в 10 % натриевой щелочи (технология НОАН). Показано, что для вывода из эксплуатации БР-10 выбран способ ТФО.

Во второй главе рассмотрена нерешенная ранее задача обращения с отработавшим ЩЖМТ, загрязненным ртутью. Показано, что предложенные ранее методы (термическая отгонка и осаждение с металлическим магнием), по разным причинам не эффективны. В качестве способа обращения с ЩЖМТ, содержащим ртуть, предложено твердофазное окисление с последующей сорбционной очисткой на пиролюзите. На модернизированном модуле

МАГМА-ТФО показана возможность удаления ртути из ЩЖМТ и выделение ртути из газовой фазы сорбцией на пиролюзите. Установлено, что образующийся комплекс (предположительно Hg_2MnO_2) устойчив при нормальных условиях.

В третьей главе приведены данные экспериментов, подтверждающие приемлемости продукта твердофазного окисления натрия и натрий-калий-ртути к длительному хранению и захоронению. Определены механическая прочность, водостойкость и скорости выщелачивания по ^{137}Cs . Показано, что данные характеристики продукта ТРО ЩЖМТ соответствуют требованиям ГОСТ Р 51883–2002 к захоронению в бетонные могильники.

Четвертая глава посвящена методам удаления недренируемых остатков ЩЖМТ. На основании анализа литературных данных и проведенных экспериментов модернизирован метод газофазного окисления (ГФО) для перевода внутриконтурного оборудования в пожаровзрывобезопасное состояние. Метод основан на взаимодействии щелочного металла с газовой смесью-реагентом, состоящей из закиси азота и углекислого газа. Показано, что при взаимодействии щелочного металла с закисью азота образуется гипонитрит щелочного металла, что теоретически позволяет достичь химической фиксации трития в виде твердой щелочи NaOT и предотвратить его выделение в защитный газ-носитель. В результате исследований был разработан, изготовлен и введен в эксплуатацию модуль ЛУИЗА для обезвреживания недренируемых остатков радиоактивного натрия в отработанных холодных ловушках первого контура и в сливных баках второго и первого контуров.

В пятой главе приведена сравнительная оценка стоимости переработки РАО натрия первого контура способами твердофазного окисления шлаком медеплавильного производства (ТФО) и растворением в 10 %-ной натриевой щелочи (технология NOAH). Показано, что стоимость захоронения переработанного натрия по методу ТФО в пять раз меньше, чем для технологии NOAH .

Приведенный в диссертационной работе текст позволяет утверждать, что при выполнении исследований решены все поставленные задачи, в том числе:

- разработан способ обращения с отработавшим ЩЖМТ, загрязненным ртутью, на базе твердофазного окисления (ТФО) и локализации выделяющейся ртути;
- разработан способ газофазного окисления недренируемых остатков ЩЖМТ для перевода реакторного оборудования в пожаровзрывобезопасное состояние;

- определены механическая прочность и скорость выщелачивания ^{137}Cs из продукта твердофазного окисления отработавшего ЩЖМТ;
- проведено сравнение стоимости переработки РАО отработавшего натриевого ЩЖМТ способами ТФО и НОАН.

Личный вклад Легких К.Г. заключается в постановке целей и задач, разработке программ экспериментов, их проведении и обработке результатов, обосновании выводов и непосредственном проведении укрупненных опытно-лабораторных испытаний по нейтрализации остатков ЩЖМТ, переработке сплава натрий-калий-ртуть.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, в том числе 6 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, тезисы 7 докладов на конференциях и патент на изобретение.

Автореферат адекватно отражает содержание диссертационной работы.

По тексту диссертации имеются следующие **вопросы и замечания:**

1. Автор отказался от классического разделения работы на «Литературный обзор» и «экспериментальную часть», что затрудняет анализ результатов, полученных именно автором.
2. В работе присутствует целый ряд неудачных формулировок, например, на защиту выносятся «проведение сравнительной оценки стоимости переработки...», хотя в тексте диссертации идет речь о результатах оценки стоимости. Разрабатываемый метод назван «газофазовое окисление», хотя, судя по тексту диссертации, окисление протекает на границе раздела твердое тело – газ.
3. В главе 4 указана возможность фиксации трития в процессе газофазной обработки ЩЖМТ, но экспериментальных данных не приводится.
4. В главе 2, предложенная структура сорбционного комплекса ртути и пиролюзита не подтверждена экспериментально, также не подтвержден и механизм сорбционной очистки газовой фазы от ртути.

Указанные замечания и рекомендации не снижают уровень научной новизны, практической значимости и качества исследований представленной диссертационной работы.

Высказанные выше замечания **не влияют на общую положительную оценку диссертации**, выполненную на высоком экспериментальном уровне и с использованием современных физико-химических методов анализа.

Считаю, что диссертационная работа Легких Кристина Геннадьевна представляет собой законченное научно-техническое исследование и соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленным пп. 9-11, 13, 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 (ред. от 25.01.2024 г.), а ее автор, Легких Кристина Геннадьевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.9 - Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность.

Официальный оппонент, доктор химических наук, старший научный сотрудник, заместитель директора – директор направления радиохимии частного учреждения «Наука и инновации» Госкорпорации «Росатом»
Шадрин Андрей Юрьевич

«25» августа 2025 года

 Шадрин А.Ю.

Частное учреждение по обеспечению научного развития атомной отрасли «Наука и инновации» (Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»)

Адрес: 119017, Москва, ул. Большая Ордынка, д. 24

e-mail: AnYShadrin@rosatom.ru

Тел.: +7-926-835-95-36

Подпись заместителя директора – директора направления радиохимии частного учреждения «Наука и инновации», доктора химических наук Шадрин А.Ю. заверяю.

Начальник управления по работе с персоналом





А.А. Терехова