



Утверждаю

Заместитель директора –
научный руководитель

А.Л. Ижутов

« 07 » 08 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Акционерного общества «Государственный научный центр –
Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (АО «ГНЦ НИИАР»)
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
ученой степени кандидата технических наук по специальности
2.4.9 – «Ядерные энергетические установки, топливный цикл и радиационная
безопасность»

Актуальность работы

В нашей стране, начиная с середины прошлого века, разрабатывалась и осваивалась технология быстрых реакторов с натриевым теплоносителем и на сегодняшний день Россия занимает лидирующие позиции в разработке реакторов на быстрых нейтронах и их эксплуатации. В АО «ГНЦ НИИАР» более 55 лет успешно эксплуатируется опытный реактор BOR-60, на Белоярской АЭС функционируют реакторы БН-600 (срок эксплуатации превышает 40 лет) и БН-800 (срок эксплуатации – более 9 лет). На стадии подготовки к выводу из эксплуатации в России находится исследовательский реактор БР-10, в Казахстане ожидает вывода из эксплуатации БН-350, в Японии – Monju, во Франции – Rapsodie.

В соответствии с нормами и правилами в области использования атомной энергии на стадии проектирования объекта использования атомной энергии необходимо предусмотреть мероприятия и порядок их реализации для обеспечения вывода из эксплуатации данного объекта, при этом должна быть обеспечена безопасность обращения с радиоактивными отходами (РАО). К РАО при выводе из эксплуатации упомянутых реакторов на быстрых нейтронах относится и радиоактивный натриевый теплоноситель первого контура и натрия второго контура. С учетом специфики физико-химических свойств щелочных жидкометаллических теплоносителей (ЩЖМТ) для их переработки не могут быть

использованы существующие технологии, подходящие для других типов РАО.

В связи с вышеуказанным является актуальной разработка, научное обоснование и экспериментальная отработка технологии переработки ЩЖМТ с получением компаунда, пригодного для захоронения и удовлетворяющего требованиям федеральных норм и правил, чему и посвящена рассматриваемая диссертационная работа, основной целью которой является обоснование применения пирохимической и газофазной технологий переработки радиоактивных ЩЖМТ (натрий, натрий-калий с примесью ртути) на примере исследовательского реактора БР-10 как научно-технического полигона для отработки технологий вывода из эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах.

Выбранная диссертантом тема представляет интерес не только для специалистов в данной области знаний, но и для организаций, занимающихся проектированием, изготовлением и эксплуатацией технических систем для вывода из эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах со ЩЖМТ, в частности, процессов кондиционирования отработавшего радиоактивного натрия.

Научная новизна работы

Впервые разработан и экспериментально подтвержден способ переработки отработавшего ЩЖМТ, загрязненного ртутью, и локализации выделяющейся ртути для обеспечения радиационной безопасности и экологической приемлемости объекта ядерной техники – реактор БР-10. Показана эффективность применения сорбционного пиролюзитового фильтра на газовой линии в составе модуля МАГМА-ТФО.

Модернизирован метод газофазного окисления недренируемых остатков ЩЖМТ для перевода внутриреакторного оборудования в пожаровзрывобезопасное состояние.

Определены скорости выщелачивания цезия-137 из образцов продуктов твердофазного окисления отработавшего ЩЖМТ, отвержденного путем сброса шлака в расплав ЩЖМТ и посредством закачки ЩЖМТ под слой шлака.

Проведена сравнительная оценка стоимости переработки РАО натрия первого контура РУ типа БН способами твердофазного окисления (ТФО) и переработки посредством его растворения в водном растворе щелочи (НОАН).

Достоверность и апробация результатов

Достоверность полученных в работе результатов и выполненных исследований подтверждается:

– воспроизводимостью результатов выполненных исследований и объемом данных, полученных в результате проведения лабораторных и стендовых исследований;

– применением методик, изложенных в ГОСТах, и согласованность полученных результатов с существующими литературными данными.

Основные положения и результаты работы были представлены автором и обсуждены в 7 докладах на российских и международных конференциях, опубликованы в 6 статьях в рецензируемых научных изданиях, включенных ВАК в перечень рецензируемых научных изданий (в том числе 4 – в индексируемых в реферативно-библиографической и наукометрической базе данных Scopus), получен 1 патент РФ на изобретение.

Практическая значимость работы

Показана возможность применения пиролюзитового фильтра в составе модуля МАГМА-ТФО для переработки отработавшего ЦЖМТ, загрязненного ртутью, что позволило отказаться от применения жидкометаллической хроматографии для предварительной очистки сплава натрий-калий-ртуть.

Экспериментально доказана эффективность использования газовой смеси-реагента, состоящей из закиси азота и углекислого газа в газе-носителе (Ar) для нейтрализации остатков ЦЖМТ в оборудовании.

Экспериментально доказано соответствие значений скоростей выщелачивания по цезию-137 образцов продуктов твердофазного окисления отработавшего ЦЖМТ требованиям НП-019-15.

Оценка содержания диссертации и ее завершенности

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 56 наименований, содержит 109 страниц, 40 рисунков и 16 таблиц.

Во **введении** раскрыта актуальность темы, определены цели и задачи работы, сформулированы основные положения, обладающие научной новизной, практической значимостью и выносимые на защиту, изложен личный вклад автора.

В **главе 1** приведен обзор литературных источников и содержится анализ методов иммобилизации отработавшего ЦЖМТ: растворение в органических растворителях, распыление щелочного металла в атмосферу закиси азота, твердофазное окисление шлаком медеплавильного производства, растворение в 10 % натриевой щелочи (технология NOAH).

В **главе 2** рассмотрена специфическая задача обращения с отработавшим ЦЖМТ, загрязненным ртутью, и локализация выделяющейся ртути. Основными научно-техническими результатами, представленными в главе 2, являются:

1. Экспериментальное подтверждение применимости пиролюзитового фильтра в составе стенда МАГМА-ТФО, при этом в основу работы стенда заложен способ ТФО щелочного металла.

2. Экспериментальное определение содержания ртути в продукте ТФО ($9,2 \cdot 10^{-5} - 1,6 \cdot 10^{-3} \%$ (мас.)) и нижних слоях засыпки пиролюзита ($15,9 - 39,3 \%$ (мас.)). Определен класс токсичности продукта ТФО – V класс токсической опасности.

3. Экспериментально установлено, что механизм сорбции паров ртути пиролюзитом – хемосорбция.

4. Экспериментально доказана стабильность сорбционного комплекса Hg_2MnO_2 при нормальных условиях и в интервале температур до 450°C .

В главе 3 проведено обоснование приемлемости продукта ТФО натрия и натрий-калий-ртути к длительному хранению и захоронению. Определены механическая прочность, водостойкость и скорости выщелачивания по цезию-137 продуктов ТФО отработанного ЩЖМТ (Na, Na-K), отвержденного различными способами (МАГМА-ТФО и МИНЕРАЛ) и продукта ТФО сплава натрий-калий-ртути. Основными научно-техническими результатами, представленными в главе 3, являются:

1. Экспериментально определены механическая прочность и скорость выщелачивания цезия-137 продукта ТФО отработавшего ЩЖМТ (Na, Na-K), отвержденного различными исполнениями данного способа (МАГМА, МИНЕРАЛ-30) на соответствие требованиям НП-019-15.

2. Экспериментально доказано соответствие полученного продукта ТФО натрий-калий-ртути критериям приемлемости: механическая прочность 27,1 МПа, скорость выщелачивания цезия-137 из образца $2,39 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^2 \cdot \text{сут}$, водостойкость 29,8 МПа. Полученные значения для продукта ТФО натрий-калий-ртути незначительно уступают аналогичным параметрам для продукта ТФО натрия: механическая прочность 38,5 МПа, скорость выщелачивания цезия-137 $8,3 \cdot 10^{-5} \text{ г/см}^2 \cdot \text{сут}$, устойчивость к длительному пребыванию в воде (90 сут) 29,8 МПа.

В главе 4 представлен анализ методов нейтрализации остатков ЩЖМТ в оборудовании ЯЭУ типа БН. Рассмотрены методы отмывки оборудования, загрязненного радиоактивным ЩЖМТ: отмывка паром, отмывка органическими растворителями, газофазное окисление. Отражены преимущества и недостатки представленных методов. Проведена модернизация метода газофазного окисления недренируемых остатков ЩЖМТ для перевода внутриконтурного оборудования в пожаровзрывобезопасное состояние. Основными научно-техническими результатами, представленными в главе 4, являются:

1. На основании экспериментальных данных был разработан, изготовлен и пущен в эксплуатацию модуль ЛУИЗА-РАО в реакторном зале реактора БР-10 (РЭ № БР-10.01-2017).

2. Способом газофазного окисления успешно нейтрализованы остатки

натрия во второй петле второго контура без демонтажа и разборки на отдельное оборудование, баки насосов, теплообменники натрий-натрий, трубопроводы и другое оборудование, два сливных бака, 16 отработавших холодных ловушек оксидов первого контура и 2 холодные ловушки оксидов второго контура.

3. Экспериментально обоснована применимость предложенного способа для нейтрализации недренируемых остатков ЩЖМТ в оборудовании непосредственно на любой РУ типа БН без сооружения дополнительных зданий или вывоза оборудования с площадки АЭС.

4. Экспериментально доказана пожаровзрывобезопасность процесса нейтрализации остатков ЩЖМТ газовой смесью за счет отсутствия образования водорода.

В главе 5 приведена сравнительная оценка стоимости переработки РАО натрия первого контура способами ТФО и НОАН. Основными научно-техническими результатами, представленными в главе 5, являются:

1. Расчетно определено, что стоимость захоронения переработанного ЩЖМТ способом ТФО в 5 раз меньше стоимости захоронения цементного компаунда, полученного при реализации способа НОАН;

2. Расчетно показано, что предварительная очистка радиоактивного ЩЖМТ от цезия-137 (на три порядка) позволяет получить компаунд, не являющийся РАО и не требующий особых условий хранения, учета и контроля;

3. Объем продукта ТФО в 2,5 раза больше исходного объема радиоактивного ЩЖМТ, объем цементного компаунда, полученного способом НОАН, в 15 раз больше исходного объема ЩЖМТ.

Содержание диссертации изложено в логически последовательной форме. Стил ь изложения в целом четкий и ясный. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК.

Автореферат в полной мере отражает наиболее существенные положения, выводы и рекомендации диссертационной работы.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Изложенные в диссертационной работе методы, подходы, результаты и выводы имеют существенное значение для составления концепций вывода из эксплуатации проектируемых, эксплуатируемых и находящихся на стадии окончательного останова реакторных установок на быстрых нейтронах с щелочными жидкометаллическими теплоносителями.

Соответствие содержания диссертации специальности

Содержание диссертации полностью соответствует паспорту специальности 2.4.9 «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная

безопасность» — в части разработки экспериментальных методик и экспериментальных исследований в реакторных условиях и вне реакторов свойств и характеристик материалов, конструкций, оборудования и систем с целью выявления закономерностей их изменения в течение жизненного цикла объектов ядерной техники.

Замечания по диссертационной работе

1. В диссертации приведено сравнение стоимости захоронения РАО, полученных разными методами, с использованием данных Минприроды России по стоимости захоронения РАО в зависимости от их класса. В п. 4 заключения диссертации написано, что проведена оценка стоимости переработки РАО, хотя по сути автор сравнивает стоимость захоронения, а не переработки, так как в диссертации нет информации о расчёте затрат на переработку РАО разными методами (по статьям калькуляции, смете затрат и т. д.).

2. В тексте работы и автореферате отсутствуют сведения о влиянии соотношения газов-реагентов на эффективность процесса газофазного окисления остатков ЩЖМТ (парциальные давления газов в газовой смеси N_2O+CO_2 , скорости подачи газовой смеси и т.д.), а также отсутствует описание алгоритма, которым следует пользоваться для определения оптимальных условий окисления ЩЖМТ газовой смесью.

3. В тексте диссертации и автореферате встречаются незначительные опечатки.

Указанные замечания не умаляют высокий научный уровень и практическую значимость диссертационной работы. Изложенные замечания в большей степени относятся к изложению материала и точности формулировок.

Представленных в диссертации и автореферате данных достаточно для понимания личного вклада соискателя в получение основных результатов работы.

Заключение

Диссертационная работа 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» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, которая полностью соответствует требованиям пп. 9 – 11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (в действующей редакции), а ее автор К.Г. Легких заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности

Заместитель председатель НТС № 1,
заместитель начальника отделения РИК
по научной работе – начальник
физико-технического департамента, к.т.н.

 А.В. Бурукин

 И.В. Киселева

Главный научный сотрудник –
эксперт, д.т.н.

И.Ю. Жемков

 B.H. MOMOTOV

М.А. Кузин

Подписи А.Л. Ижutowa, А.В. Бурукина, И.В. Киселевой, И.Ю. Жемкова,
В.Н. Момотова, М.А. Кузина заверяю

Ученый секретарь АО «ГНЦ НИИАР»   Д.А. Корнилов



Почтовый адрес: Россия, 433510, Ульяновская область, г. Димитровград, Западное шоссе, д. 9, Акционерное общество «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (АО «ГНЦ НИИАР»)
Телефон: 8 (84235) 9-83-83
Адрес электронной почты: niiar@niiar.ru
Официальный сайт: <http://www.niiar.ru>