

ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

Понкратов Юрий Валентинович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА С ЖИДКИМ  
ЛИТИЕМ В УСЛОВИЯХ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Томск – 2023

Работа выполнена в лаборатории внутриканальных реакторных испытаний филиала Институт атомной энергии республиканского государственного предприятия на правах хозяйственного ведения «Национальный ядерный центр Республики Казахстан».

**Научный руководитель:**

**Никитенков Николай Николаевич**

доктор физико-математических наук, профессор  
Инженерная школа ядерных технологий  
Федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего  
образования «Национальный  
исследовательский Томский политехнический  
университет», г. Томск.

**Официальные оппоненты:**

**Кутеев Борис Васильевич**

доктор физико-математических наук,  
профессор, заместитель руководителя  
отделения токамаков по гибридным реакторам,  
Комплекс термоядерной энергетики и  
плазменных технологий Национальный  
исследовательский центр «Курчатовский  
институт», г. Москва

**Борисов Анатолий Михайлович**

доктор физико-математических наук, профессор  
кафедры "Технология производства приборов и  
информационных систем управления  
летательных аппаратов», Московский  
авиационный институт (Национальный  
исследовательский университет), г. Москва

**Защита состоится «13» декабря 2023 г. в 15:00 часов** на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.03 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», по адресу: 634028, г. Томск, пр. Ленина, 2а, строение 4, аудитория 245.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте [dis.tpu.ru](http://dis.tpu.ru) при помощи QR-кода.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета ДС.ТПУ.03  
доктор технических наук

 С. А. Гынгазов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** В перспективе термоядерная энергетика может стать наиболее чистым источником энергии, доступным человечеству. Отсутствие накопления высокоактивных отходов и внутренняя безопасность, присущая термоядерным реакторам (ТЯР), преимущественно выделяют их на фоне ядерных реакторов деления. До настоящего момента в мире многими научными коллективами были проработаны разнообразные конструкции ТЯР, однако уже на стадии проектирования одной из основных инженерных задач являлся выбор материала для изготовления внутрикамерных элементов, стабильно работающих при взаимодействии с высокотемпературной плазмой.

Многочисленные исследования, проводимые в поддержку международных проектов по созданию перспективных термоядерных энергетических установок нового поколения, показали, что решение проблемы выбора обращенных к плазме материалов (ОПМ) вызывают серьезные вопросы. Учитывая, что верхней границей практического использования традиционных твердых материалов таких как вольфрам, бериллий, графит являются тепловые потоки плотностью от 5 МВт/м<sup>2</sup> до 10 МВт/м<sup>2</sup>, возникает ряд серьезных трудностей при выборе материалов, которые в долгосрочной перспективе смогут стабильно работать в условиях высоких, можно сказать запредельных, плазменных и радиационных нагрузок. Наряду с этим, серьезными проблемами стабильной работы термоядерных установок является загрязнение плазмы тяжелыми примесями при распылении ОПМ, в результате чего возникают срывы разряда плазменного шнура и периферийные моды на границе плазмы (так называемые ЭЛМ-ы), а при распылении ОПМ в продуктах эрозии происходит накопление трития. Решением вышеуказанных проблем может стать замена традиционных материалов на материал с меньшим атомным зарядом  $Z$ .

Одним из таких материалов является металлический литий, для которого особенно перспективно применение в жидкой фазе. Имеющийся на сегодняшний момент опыт использования литиевых технологий в термоядерных установках показал, что применение лития в качестве ОПМ в будущих ТЯР позволит уменьшить энергетические нагрузки на первую стенку и дивертор за счет переизлучения энергии на периферии плазменного шнура на нейтральных атомах лития, что облегчит проблему отвода тепла от внутрикамерных элементов. Также применение лития повышает плазменные параметры термоядерных реакторов за счет уменьшения эффективного зарядового числа плазмы близкого к единице. Использование способности жидкого лития самообновлять поверхность, взаимодействующую с плазмой, позволит разработать внутрикамерные устройства нового типа с приемной поверхностью, обладающих практически неограниченным ресурсом и обеспечит лимитированное присутствие в плазме продуктов эрозии ОПМ, что снизит накопление трития во внутрикамерных элементах реактора.

Однако для того, чтобы окончательно обосновать перспективность использования жидкого лития в качестве ОПМ в ТЯР, необходимо иметь достоверные данные о процессах генерации трития, сорбции, десорбции изотопов водорода при их взаимодействии с жидким литием в условиях синергетического воздействия тепловых и радиационных нагрузок (нейтронное и гамма излучение), условно моделирующих режимы работы ТЯР. Известно, что вероятней всего установки для полного моделирования условий термоядерного реактора в ближайшем будущем не появятся, хотя это является важным фактором испытаний и выбора ОПМ. Однако, для моделирования воздействия потоков термоядерной плазмы на материалы ТЯР, в частности ее радиационной составляющей можно использовать исследовательские

ядерные реакторы. Таким образом, исследования процессов взаимодействия лития в жидкой фазе с изотопами водорода в условиях нейтронного излучения являются актуальными.

**Степень разработанности темы.** До настоящего момента в мире, на действующих токамаках, неоднократно проводились эксперименты с применением жидкого лития в качестве внутрикамерных элементов. Данной тематике были посвящены работы российских ученых Мирнова С.В., Белова А.М., Лазарева В.Б., Нестеренко В.М., Люблинского И.Е., Верткова А.В., зарубежных ученых G. Mazzitelli, M.L. Apicella, D. Frigione, G. Maddaluno, S. Mazzotta, V. Pericoli Ridolfini. Особое внимание в этих работах было уделено исследованиям влияния жидкого лития на параметры плазмы в экспериментах, проводимых на токамаке T-11 (Троицк, Россия) и токамаке FTU (Фраскати, Италия). В экспериментах были задействованы лимитеры, у которых на поверхности, обращенной к плазме, размещался жидкий литий. Значительный вклад в развитие представлений о процессах сорбции, десорбции, растворимости изотопов водорода в жидком литии при взаимодействии с высокотемпературной дейтерий-дейтериевой и дейтерий-третиевой плазмой внесли зарубежные ученые R. Majeski, J-W. Ahn, L. Berzak, T. Gray, H. Kugel, J. Allain, M. Bell, R. Bell, A. Diallo, R. Ellis, S. Gerhardt, B. Heim, M. Jaworski. Данными исследователями проведены эксперименты с жидким литием на токамаках NSTX и LTХ (Принстон, США). На NSTX проводились эксперименты с полностью литиевым дивертором, в экспериментах на LTХ первая стенка была покрыта жидким литием (порядка 90%). Эксперименты с литиевым лимитером gJ литиизации поверхности вакуумной камеры проводились на токамаке T-10 (Россия). Наряду с этими исследованиями эксперименты с жидким литием проводятся и на других токамаках, таких как EAST (Хэфэй, Китай), КТМ (Курчатов, Казахстан), а также на стеллараторе TJ-II (Барселона, Испания).

Анализ работ по использованию литиевых технологий в установках управляемого термоядерного синтеза, показал, что взаимодействие плазмообразующих газов с ОПМ, в нашем случае с жидким литием, является трудной проблемой в области физики термоядерных реакторов. Знание о процессах и механизмах взаимодействия жидкого лития с изотопами водорода крайне важны с точки зрения разработки конструкций внутрикамерных элементов термоядерного реактора, а также выбора режимов правильной эксплуатации будущих ТЯР, учитывающей ограничения, накладываемые взаимодействием плазмы с ОПМ. Особенно важным является понимание механизмов, связанных с процессами рециклинга изотопов водорода в ОПМ, происходящих в пристеночной плазме. Так как литий обладает высокими сорбционными свойствами по отношению к плазмообразующим газам (водород, дейтерий, тритий), то процессы их транспорта в жидком литии являются определяющими при выборе режимов эксплуатации термоядерного реактора. Изучению этих процессов было посвящено много работ, проведенных на действующих токамаках и плазмо-физических установках, однако у этих установок нет возможности реализовать такой фактор воздействия на ОПМ, как влияние нейтронного излучения высокой плотности. Стоит отметить, что экспериментальных данных о влиянии реакторного облучения на параметры взаимодействия жидкого лития с изотопами водорода найти не удалось. Наряду с исследованием процессов транспорта изотопов водорода в литии, отдельным направлением является изучение механизмов генерации трития в жидком литии и его выделения из металла. Во многих случаях реакторные эксперименты по генерации трития проводились, но это было облучение литиевой керамики и свинцово-литиевой эвтектики. Данных по наработке трития в литии и его выходу из жидкого металла при нейтронном облучении ограниченное количество, а те, что имеются довольно-

таки противоречивы. Таким образом на данный момент существует проблема выявления механизмов и процессов сорбции (десорбции) изотопов водорода жидким литием, а также процессов наработки и выделения трития из жидкого лития в процессе нейтронного облучения и есть необходимость разработки моделей, позволяющих описать эти механизмы и процессы. Для решения обозначенной проблемы в филиале ИАЭ НЯЦ РК имеется исследовательский ядерный реактор ИВГ.1М, который позволяет решать задачи по данному направлению исследований.

**Целью работы** является исследование закономерностей взаимодействия изотопов водорода с жидким литием (сорбция, десорбция, растворимость) и процессов генерации трития и гелия в литии, в условиях одновременного воздействия нейтронного облучения и высоких температур. Описание механизмов и определение параметров этого взаимодействия.

**Объектом исследования** является литий марки ЛЭ-1 (изотопный состав:  ${}^6\text{Li}$  – 7,5%;  ${}^7\text{Li}$  – 92,5%), который перед проведением экспериментов был очищен от неметаллических примесей комбинированным методом вакуумной дистилляции и геттерирования.

**Предмет исследования** – процессы и механизмы взаимодействия жидкого лития с изотопами водорода (сорбция, десорбция и растворимость изотопов водорода, генерация трития и его выделение) в условиях одновременного воздействия нейтронного облучения и высоких тепловых нагрузок.

#### **Научная новизна результатов.**

1. Впервые проведены эксперименты по облучению жидкого лития с одновременной масс-спектрометрической регистрацией в реальном времени изменения парциального давления изотопов водорода над исследуемыми образцами.
2. Впервые зарегистрированы изменения скорости сорбции (десорбции) жидким литием изотопов водорода в зависимости от нейтронного потока и температуры в условиях реакторного облучения.
3. Впервые зарегистрированы изменения скорости выхода трития из жидкого лития в зависимости от нейтронного потока и температуры в условиях реакторного облучения.
4. Определены параметры процессов сорбции (десорбции) изотопов водорода жидким литием, а также параметры генерации и выделения трития из жидкого лития в процессе реакторного облучения, предложены модели, описывающие механизмы этих процессов.

#### **Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Разработанные и апробированные оригинальные методики проведения экспериментов на реакторе ИВГ.1М по исследованию процессов сорбции/десорбции изотопов водорода жидким литием, а также по изучению процессов генерации трития и гелия в литии в зависимости от времени, температуры исследуемого образца и плотности нейтронного потока.
2. Обнаруженный эффект ускорения процесса поглощения изотопов водорода литием обусловлен увеличением скорости конвективного перемешивания жидкого металла за счет термализации ионов трития и гелия, образующихся в литии в результате ядерных реакций  ${}^6\text{Li} + n \rightarrow \text{T} + {}^4\text{He} + 4,79 \text{ МэВ}$  и  ${}^7\text{Li} + n \rightarrow \text{T} + {}^4\text{He} + n - 2,47 \text{ МэВ}$ .
3. Установлен и описан обратимый процесс образования-распада тритида лития ( $\text{LiT}$ ), который существенно влияет на механизмы выделения трития из лития, заключающийся в увеличении скорости распада тритида лития и уменьшении энергии активации освобождения трития из ловушек при повышении температуры.
4. Обнаружены эффекты экспоненциального увеличения концентрации свободных атомов трития в жидком литии и изменения качественного состава тритийсодержащих молекул,

выделяющихся из лития при повышении температуры исследуемого образца в процессе нейтронного облучения.

**Методология диссертационного исследования.** Для выполнения поставленных задач использовался исследовательский ядерный реактор ИВГ.1М с плотностью потока: по тепловым нейтронам –  $3,5 \cdot 10^{14}$  н/см<sup>2</sup>·с; по быстрым нейтронам –  $1,2 \cdot 10^{13}$  н/см<sup>2</sup>·с. Для проведения нейтронно-физических и теплофизических расчетов, с целью обоснования конструкции облучательных устройств и выбора режимов проведения экспериментов, были использованы лицензионная программа MCNP5 с библиотеками констант ENDF/B-5,6 и программный комплекс ANSYS Fluent v.14. Для реализации методик проведения экспериментов на исследовательском реакторе ИВГ.1М в условиях воздействия на жидкий литий изотопов водорода, температуры и нейтронного облучения использовался экспериментальный стенд ЛИАНА. Для исследования закономерностей поглощения изотопов водорода жидким литием в условиях реакторного облучения использовался адсорбционный метод. Для исследования закономерностей выделения изотопов водорода и гелия из жидкого лития в процессе реакторного облучения использовался масс-спектрометрический метод. Для получения временных зависимостей выхода изотопов водорода из жидкого лития в условиях реакторного облучения использовался метод термостимулированной десорбции. Для моделирования процессов взаимодействия жидкого лития с изотопами водорода в условиях высоких тепловых и радиационных нагрузок, расчета основных параметров генерации и выделения трития из лития, определения параметров сорбции-десорбции и растворимости изотопов водорода в литии, при различных экспериментальных условиях, использовались лицензионные ПО Mathcad, ПО Comsol Multiphysics и ПО LISE++.

**Достоверность** полученных в данной работе результатов подтверждается применением современных методов, у которых достаточная воспроизводимость результатов измерений, и обработкой экспериментальных данных на современном оборудовании. Статистическая обработка полученных данных проводилась с заданной вероятностью и необходимым количеством повторных испытаний. Исследования проводились с использованием верифицированных методик и применением откалиброванных средств для измерения-регистрации температуры, абсолютного давления, парциального давления и масс-спектров. Полученные результаты не противоречат имеющимся в мировой научной литературе данным в области пересечения исследований жидкометаллических литийсодержащих материалов. Опубликованные в рейтинговых изданиях материалы по теме исследования и полученные патенты также свидетельствуют о достаточной апробации, подтверждающей достоверность полученных результатов.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Детальное описание процессов взаимодействия лития с изотопами водорода в условиях одновременного воздействия нейтронного облучения и высоких тепловых нагрузок существенно дополняет имеющуюся базу данных о свойствах лития и об изменении его свойств в условиях реальной работы в ТЯР. Полученные новые экспериментальные данные позволят расчетно-экспериментальными методами обосновать использование жидкого лития в качестве плазмообращенного материала как на действующих установках управляемого термоядерного синтеза, так и при разработке будущих термоядерных реакторов. Востребованность и практическая значимость результатов выполненной работы определяются: а) развитием оригинальных методик и экспериментальной базы для определения параметров взаимодействия изотопов водорода с конструкционными и функциональными материалами ядерных и термоядерных установок в

процессе реакторного облучения; б) использованием полученных экспериментальных результатов при обосновании выбора конструкции будущих термоядерных реакторов и условий их безопасной эксплуатации, а также других ядерно-энергетических установок, которые будут работать в условиях одновременного воздействия на материалы изотопов водорода, тепловых нагрузок и ионизирующих излучений; в) возможностью применения полученных экспериментальных данных для создания теоретических моделей поведения изотопов водорода в жидких металлах и сплавах в процессе облучения.

**Апробация работы.** Основные результаты представлены и обсуждены на следующих 14 международных научных конференциях: 5th International Symposium on Liquid Metal Applications for Fusion (ISLA-2017); Международный научный форум «Ядерная наука и технологии», Казахстан, Алматы, 2018, 2019, 2021; V Международная научно-техническая конференция «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (МНТК НИКИЭТ – 2018); International Conference on Nanomaterials and Advanced Energy Storage Systems (INESS2018, INESS2019, INESS2020); Symposium on Fusion Technology (SOFT 2018); Международная конференция «Проблемы термоядерной энергетики и плазменные технологии», 2019; 12th International Conference on Tritium Science and Technology (Tritium 2019); International Conference on Fusion Reactor Materials (ICFRM-19, ICFRM-20); 3rd Asia Pacific Symposium on Tritium Science. (APSOT-3), 2020.

**Публикации.** Основные результаты исследований изложены в 26 работах. В том числе 20 статей опубликовано в журналах, входящих в базы данных Scopus и Web of Science. 8 статей из списка ВАК (три из них, индексируемые системой РИНЦ). Четыре публикации представляют собой национальные патенты Республики Казахстан (из них один патент на изобретение и три патента на полезную модель).

**Личный вклад автора.** Постановка цели и задач исследования. Сбор и анализ данных по исследованиям применения материалов на основе лития в качестве обращенных к плазме материалов ТЯР. Разработка ампульных устройств, участие в разработке методики реакторных экспериментов. Участие в проведении методических, дореакторных и облучательных экспериментов на реакторе ИВГ.1М. Обработка и анализ полученных результатов, разработка моделей, описывающих процессы взаимодействия жидкого лития с изотопами водорода в условиях высоких тепловых и радиационных нагрузок.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 90 наименований. В работе имеется 68 рисунков, 20 таблиц и 49 формул. Общий объем диссертации равен 129 страницам.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** описывается актуальность работы, сформулированы цели и поставлены задачи исследования, указаны основные положения, выносимые на защиту, приводятся результаты исследований, обосновывающие научную новизну и практическую значимость работы.

**В первой главе** приведены обзор и анализ литературных данных по применению литиевых технологий в установках управляемого термоядерного синтеза. Приводится подробное описание свойств лития, а также его взаимодействия с другими химическими элементами и соединениями. Описывается концепция применения в ТЯР лития в качестве обращенного к плазме материала и рассматриваются его преимущества перед традиционными твердыми материалами. Также обсуждаются работы по применению литиевых технологий на токамаках TFTR (США), T-11M (Россия), FTU (Италия), CDX-U/LTX (США), NSTX (США),

T-10 (Россия), EAST (Китай), на стеллараторе TJ-II (Испания) и плазменных установках СПРУТ-4, КСПУ, МК-200UG, «Плазменный фокус». Анализ этих исследований позволяет сделать вывод, что литий способен выдерживать как квазистационарной нагрузки, так и импульсные нагрузки при срыве плазменного тока без разрушения поверхности. Экспериментально продемонстрирована высокая эффективность литиизации как метода защиты первой стенки вакуумной камеры ТЯР, который позволяет существенно улучшить параметры плазмы (уменьшить  $Z_{\text{eff}}$ , увеличить время удержания плазмы  $\tau_E$ ), позволяет управлять рециклингом рабочего газа, снижает уровень накопления изотопов водорода (третия) в ОПМ. Для успешного применения жидкого лития в реакторах синтеза, важным является знание о механизмах и параметрах его взаимодействия с водородом, дейтерием, тритием в условиях, моделирующих радиационную составляющую работы термоядерных реакторов (нейтронное излучение), но таких данных имеется очень немного. В данной работе впервые сформулированы и поставлены задачи по исследованию процессов взаимодействия лития в жидкой фазе с водородом, дейтерием и тритием в условиях нейтронного облучения.

**Вторая глава** посвящена технике и методикам проводимых экспериментов. В ней приводится описание исследовательской ядерной установки ИВГ.1М, расположенной в филиале ИАЭ НЯЦ РК, и описание экспериментального стенда ЛИАНА, предназначенного для проведения работ по изучению процессов взаимодействия изотопов водорода с различными материалами с в условиях реакторного облучения<sup>1</sup>. Описываются ампульные устройства (АУ), предназначенные для проведения экспериментов по облучению лития в жидкой фазе и жидкого лития, стабилизированного в металлической матрице, так называемой капиллярно-пористой структуре (КПС). Было разработано и изготовлено два экспериментальных АУ (рисунок 1), которые в последующем были использованы для проведения экспериментов по исследованию взаимодействия жидкого лития с изотопами водорода в условиях нейтронного облучения.

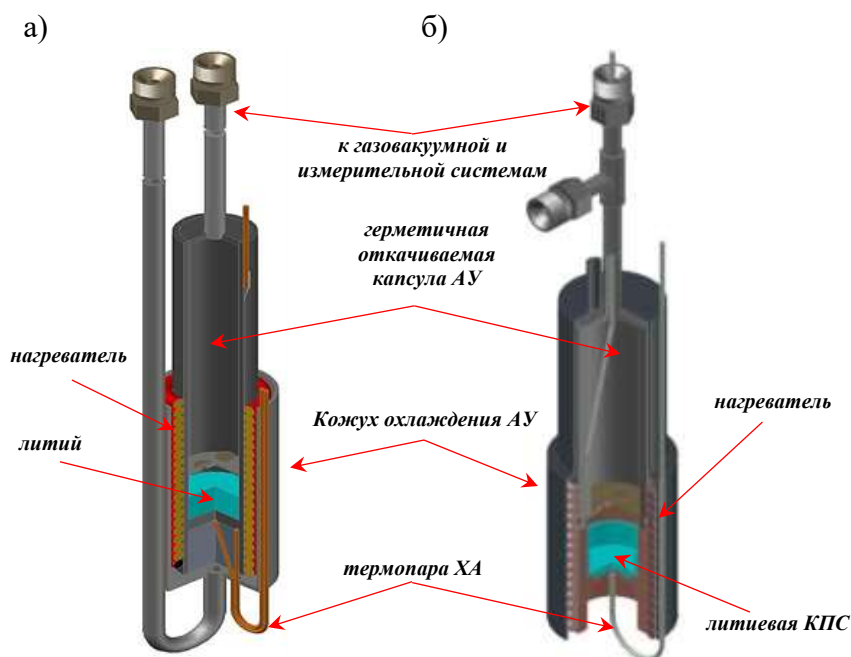


Рисунок 1. 3D изображение экспериментального ампульного устройства: а) с образцом лития; б) с образцом литиевой КПС.

<sup>1</sup> Тажобаева И.Л. Определение параметров взаимодействия изотопов водорода с жидким литием и литиевой капиллярно-пористой системой в условиях реакторного облучения / И.Л. Тажобаева и др.// ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез. – 2013.– Том 36. Выпуск № 4.– С. 25-38.



В главе приводятся выполненные в обоснование безопасности проведения реакторных экспериментов и выбора необходимых экспериментальных режимов результаты нейтронно-физических и теплофизических расчетов разработанных АУ. Расчеты проводились с использованием программы MCNP5, с библиотеками констант ENDF/B-5,6 и системы конечно-элементного (МКЭ) анализа ANSYS Fluent v.14. Описываются также верифицированные методики проведения реакторных экспериментов с жидким литием, разработанные с использованием абсорбционного, термодесорбционного, масс-спектрометрического методов<sup>2</sup>.

В третьей главе описываются сценарий и ход проведения экспериментов, и приводятся полученные экспериментальные данные. Эксперименты проводились с образцами жидкого лития и литиевой КПС, которые были загружены в центральный экспериментальный канал ядерного реактора ИВГ.1М. Всего было реализовано несколько серий экспериментов, включая вне реакторные и реакторные. Исследования процессов взаимодействия лития с изотопами водорода в условиях нейтронного облучения проводились с использованием метода газовой абсорбции. Эксперименты проводились при следующих условиях: температура образца – 200 °С; 250 °С; 300 °С и 350 °С; остаточное давление в измерительном тракте –  $10^{-4}$  Па; давление водорода в объеме с образцом – от 70 Па до 130 Па; тепловая мощность реактора ИВГ.1М – 1; 3 и 6 МВт. Результаты одной из серий реакторных экспериментов приведены на рисунке 2.

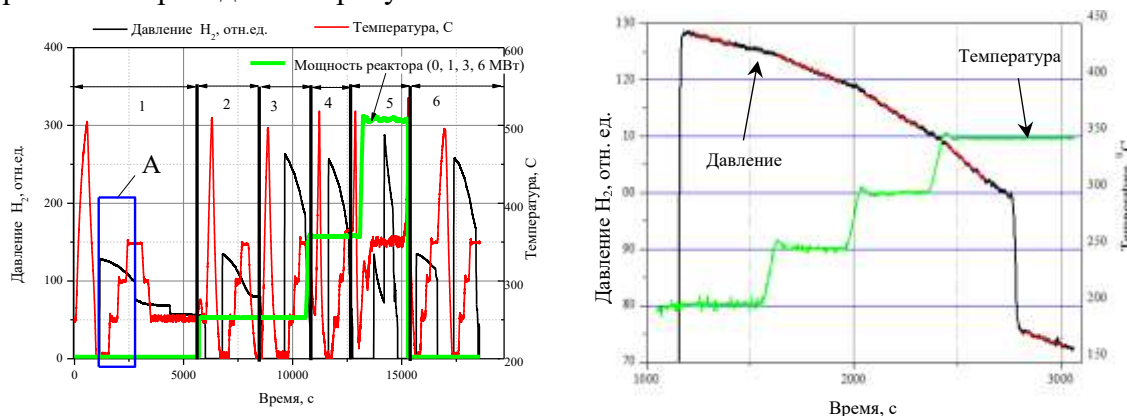


Рисунок 2. Зависимость давления водорода в объеме АУ от температуры жидкого лития и тепловой мощности ядерного реактора (справа увеличенный участок А, без облучения)

В результате проведенных работ были получены значения абсолютного давления водорода в АУ в зависимости от температуры исследуемых образцов и плотности нейтронного потока. Значения были зарегистрированы в температурном диапазоне от 200 °С до 350 °С при мощностях ядерного реактора 1, 3 и 6 МВт, а также и без реакторного облучения. При проведении экспериментов был зафиксирован эффект увеличения скорости поглощения водорода жидким литием, который напрямую зависит от плотности нейтронного потока.

Также в главе приводится описание экспериментов по исследованию генерации и выделению трития из жидкого лития. На первом этапе с использованием метода газовой абсорбции были проведены реакторные эксперименты с образцом литиевой КПС. Эксперименты проводились при следующих условиях: парциальные давления остаточных газов (ОГ) в АУ и измерительном тракте – от  $10^{-4}$  Па до  $10^{-6}$  Па; температуры исследуемого образца – от 200 °С до 500 °С; эквивалентная тепловая мощность ИВГ.1М – 1, 2 и 6 МВт. На

<sup>2</sup> Gordienko, Yu. Research facilities of IAE NNC RK (Kurchatov) for investigations of tritium interaction with structural materials of fusion reactors / Yu. Gordienko, Yu. Ponkratov [et al.] // Fusion Science and Technology. – 2020. – V. 76, Is. 6. – P. 703-709.

рисунке 3 приведены экспериментальные данные одной из серий реакторных экспериментов, проведенных с образцом литиевой капиллярно-пористой системы.

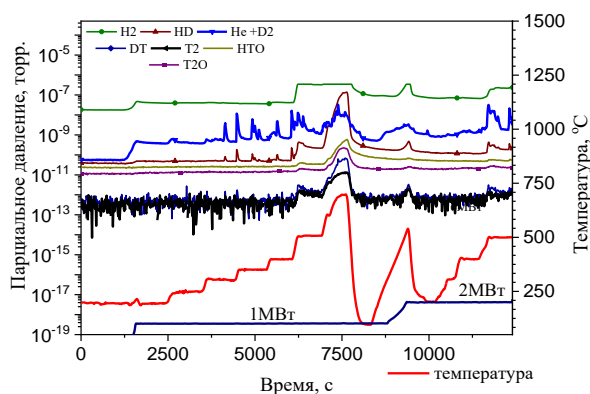


Рисунок 3. Зависимость парциальных давлений ОГ от температуры образца на мощностях реактора 1 и 2 МВт

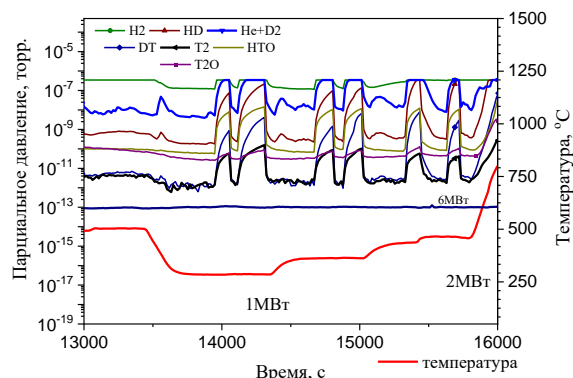


Рисунок 4. Зависимость парциальных давлений ОГ от температуры образца на мощности реактора 6 МВт

В эксперименте на мощностях реактора 1 и 2 МВт регистрация параметров велась в режиме непрерывной откачки (дифференциальный метод). При данном режиме значения парциального давления трития и молекул, содержащих атомы трития находились на пределе чувствительности масс-спектрометра, что объясняется низкой скоростью конвективного перемешивания жидкого лития в КПС. Было зарегистрировано изменение парциального давления гелия в АУ. Гелий, родившийся в объеме жидкого лития, выходил из образца безактивационным путем. В эксперименте на 6 МВт использовался интегральный метод регистрации (периодически закрывалась откачка АУ и велась регистрация парциальных давлений ОГ). В результате эксперимента были зарегистрированы значения парциального давления трития и тритийсодержащих молекул (рисунок 4).

Далее была проведена серия реакторных экспериментов с образцом жидкого лития. Перед проведением реакторных экспериментов, литий был насыщен дейтерием. Общее количество поглощенного дейтерия литием составляло  $\sim 1,6 \cdot 10^{-3}$  моль. Эксперименты проводились при следующих условиях: парциальные давления ОГ в АУ и измерительном тракте –  $10^{-5}$  Па; температуры исследуемого образца – от 80 °С до 450 °С; тепловая мощность реактора – 2 и 6 МВт. На рисунках 5 и 6 приведены данные двух реакторных экспериментов, проведенных с образцом жидкого лития.

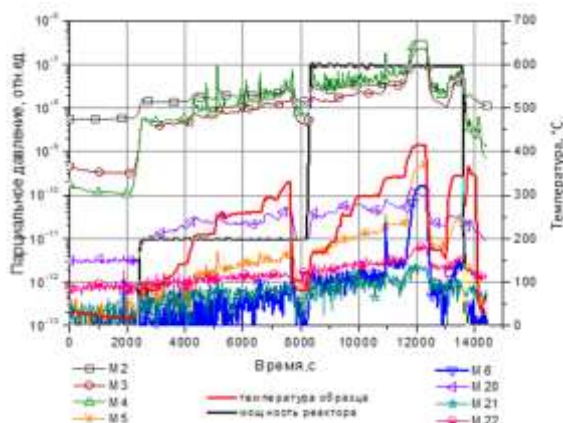


Рисунок 5. Зависимость парциальных давлений ОГ в АУ от температуры лития на мощностях реактора 2 и 6 МВт

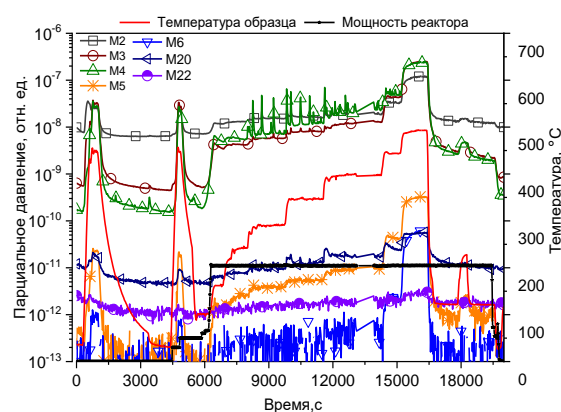


Рисунок 6. Зависимость парциальных давлений ОГ в АУ от температуры лития на мощности реактора 2 МВт

Из приведенных данных видно, что выделение молекул DT начинается сразу после начала реакторного облучения и поток возрастает пропорционально увеличению температуры лития. При температурах от 150 °С до 200 °С выделение молекул DT имеет стационарный характер. При повышении температуры образца более 250 °С для выхода на следующий стационарный уровень выделения молекул DT из жидкого лития требуется меньше времени. При температуре 400 °С выделение T<sub>2</sub> из лития становится заметным. При повышении температуры выше 450 °С растут значения парциальных давлений DTO (M21) и T<sub>2</sub>O (M22).

**Четвертая глава** содержит анализ экспериментальных данных, полученных в результате проведенных исследований взаимодействия жидкого лития и литиевой КПС с изотопами водорода при нейтронном облучении.

В данной главе представлен анализ результатов серии реакторных экспериментов. В ходе анализа экспериментальных данных была выполнена оценка влияния нейтронного потока и температуры на скорость поглощения изотопов водорода жидким литием и проведены расчеты эффективной скорости взаимодействия водорода с литием. Расчеты проводились с использованием следующей формулы<sup>3</sup>:

$$k = - \frac{dv}{dt} \cdot \frac{1}{S_{эфф} \cdot P(t)} = - \frac{\frac{dP(t)}{dt}}{P(t)} \cdot \frac{V}{R \cdot T \cdot S_{эфф}}, \quad (1)$$

где  $k$  – константа взаимодействия водорода с литиевым образцом;  $dv$  – количество молей газа провзаимодействовавшего с образцом за время  $dt$ ;  $V$  – объем АУ с образцом лития;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – температура газа;  $P$  – давление газа в АУ с образцом лития;  $P'$  – скорость изменения давления изотопов водорода в ампульном устройстве;  $S_{эфф}$  – площадь литиевой поверхности взаимодействующая с изотопами водорода.

Расчеты были проведены для всех абсорбционных экспериментов. Рассчитанные параметры взаимодействия представлены на рисунке 7.

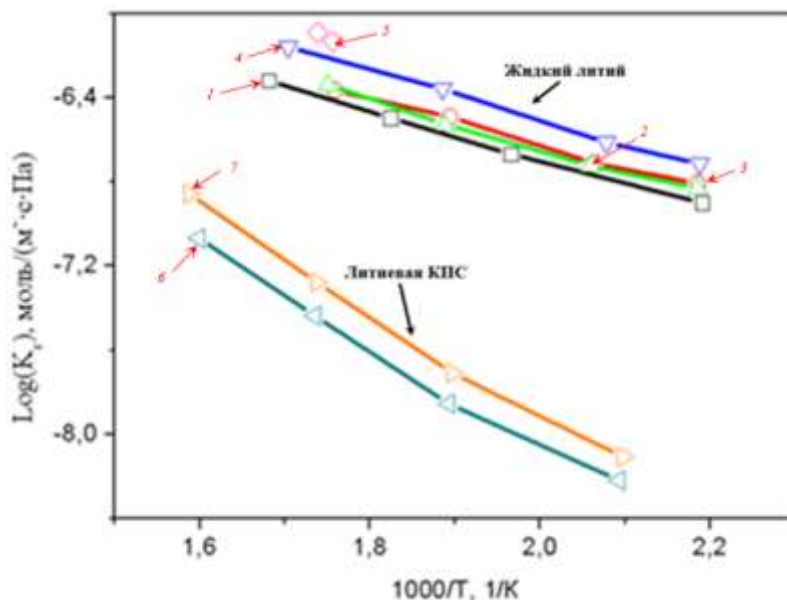


Рисунок 7. Зависимость константы взаимодействия водорода от температуры. *Жидкий литий*: 1 - без облучения; 2, 3- эксперименты, 1 МВт; 4 - эксперименты, 3 МВт; 5 - эксперименты, 6 МВт. *Литиевая КПС*: 6 - без облучения; 7 - эксперименты, 2 МВт

<sup>3</sup> Писарев А.А. Проницаемость водорода через металлы / А.А. Писарев, И.В. Цветков, Е.Д. Маренков, С.С. Ярко. // М.: МИФИ, 2008. – 144 с.

Для прояснения механизма поглощения изотопов водорода жидким литием были рассмотрены процессы, происходящие на поверхности лития при его насыщении из газовой фазы. Сделав оценку скорости поглощения предположено, что этот процесс определяется объемной диффузией изотопов водорода в образец.

Основными уравнениями, описывающими массоперенос водорода в металлах, являются уравнения Фика. Для одномерного случая уравнение записывается таким образом<sup>4</sup>:

$$J = -D \frac{dc}{dx}, \quad (2)$$

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{d^2C}{dx^2} \quad (3)$$

В нашем случае, в начальное время поглощения изотопов водорода литием, выполняются граничные условия первого рода. Есть представление что концентрация водорода на поверхности лития устанавливается мгновенно и соответствует равновесной растворимости. Отсюда для двухатомного газа уравнение запишется следующим образом:

$$\begin{cases} C_0|_{t \geq 0} = S_H \sqrt{P_o}, & x = 0 \\ C_0|_{t \geq 0} = S \sqrt{P_l}, & x = l \end{cases}, \quad (4)$$

где,  $S_H = S_o \exp(-H_s/RT)$  – растворимость, приведенная к единице давления;  $S_o$  – постоянная растворимости;  $H_s$  – теплота растворения;  $R$  – газовая постоянная;  $T$  – температура;  $P_o$  и  $P_l$  – давление водорода на границах (например, на входной и выходной стороне образца).

В соответствии с первым законом Фика входной поток водорода сквозь образец единичной площади запишется следующим образом<sup>5</sup>:

$$J = \frac{DS_H}{l} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \exp \left( -\frac{D\pi^2 n^2}{l^2} \cdot t \right) \right] \right\}, \quad (5)$$

На рисунке 8 приведены временные изменения потока водорода в жидком литии, рассчитанные для различных коэффициентов диффузии водорода в литии.

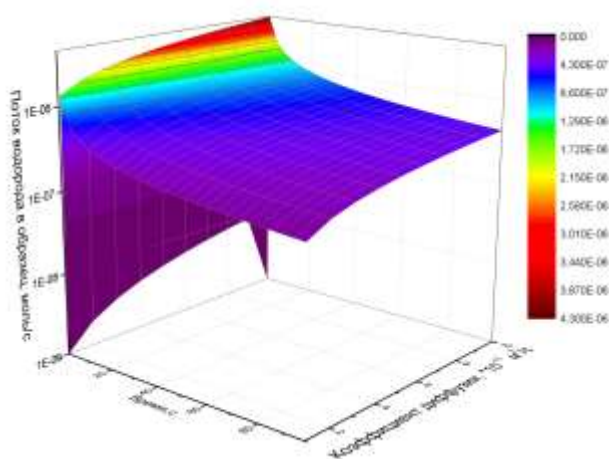


Рисунок 8. Значения потока водорода в образце в зависимости от времени, рассчитанные для различных коэффициентов диффузии водорода в литии

<sup>4</sup> Гордиенко Ю.Н. Применение метода водородопроницаемости реакторных экспериментах по исследованию взаимодействия изотопов водорода с конструкционными материалами / Ю.Н. Гордиенко, Н.Н. Никитенков и др. // Известия Томского политехнического университета: Математика и механика. Физика. 2014. Т. 324. № 2. С. 149-162.

<sup>5</sup> Crank J. The mathematics of diffusion. – Oxford: Oxford University press, 1975. – 425 p.

Взяв нижнюю оценку коэффициента диффузии водорода в литии как  $10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с, получим, что средняя величина потока водорода в образец составляет около  $10^{-7}$  моль/с. Реальные значения потока, рассчитанные по экспериментальным данным, составляют примерно  $10^{-9}$  моль/с. Это связано с изменением скорости поглощения водорода литием и процессом растворения водорода с поверхности образца. Учитывая это было записано уравнение баланса для атомов водорода на поверхности лития:

$$\frac{\Delta N_{\text{H}}}{\Delta t} = K_{\text{прил}} \psi p S_{\text{эф}} - \chi N_0 \quad (6)$$

где,  $K_{\text{прил}}$  – коэффициент прилипания водорода, равный отношению общего числа приходящих на поверхность частиц из газовой фазы к числу адсорбированных частиц;  $\psi$  – газокинетический коэффициент, равный числу молекул, приходящих на единицу поверхности в единицу времени при единичном давлении водорода, моль/(с·Па·м<sup>2</sup>);  $p$  – давление атомов водорода; Па;  $S_{\text{эф}}$  – эффективная площадь взаимодействия, равная поверхности чистого лития, м<sup>2</sup>;  $N_0$  – концентрации адсорбированных атомов жидкого лития на входной поверхности, моль/м<sup>2</sup>;  $\chi$  – константа скорости растворения, с<sup>-1</sup>.

Далее выполнена оценка количества атомов водорода, находящихся на поверхности лития с учетом взаимодействия образовавшихся в приповерхностном слое гидридов с ионами трития и гелия. Дело в том, что ионы, рожденные в результате ядерных реакций лития с нейтронами, проходя через приповерхностный слой и поверхность лития способны за счет своей энергии разрушать гидриды, тем самым освобождая место для свободных атомов лития. Значения средней длины пробега в жидком литии ионов трития и гелия, были оценены с использованием формулы Бете – Блоха<sup>6</sup> с использованием программной среды LISE++ (рисунок 9).

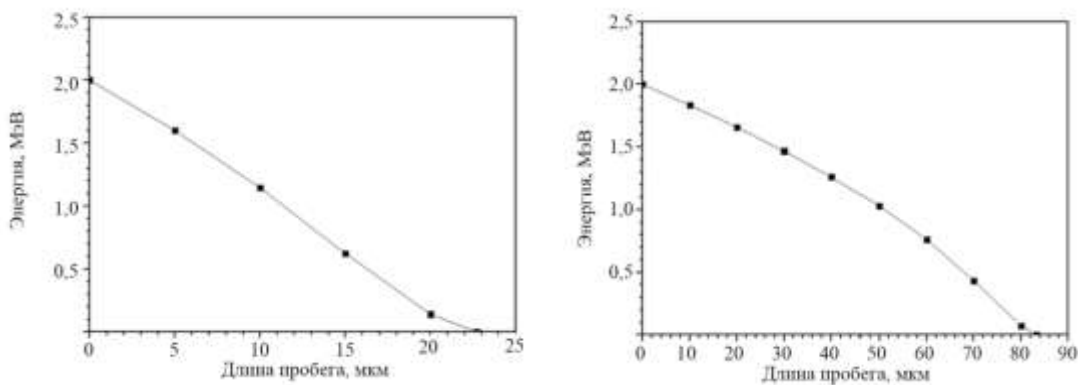


Рисунок 9. Зависимость длины пробега ионов (термализация) в жидком литии от их энергии: слева для ионов трития; справа для ионов гелия.

Тогда уравнение баланса (6) с учётом предположений об образовании на поверхности гидрида лития и его взаимодействия с ионами гелия и трития примет следующий вид:

$$N_{\text{H}}^{i+1} = N_{\text{H}}^i + \frac{p_0 \prod_{k=1}^{i-1} \left[ 1 - \frac{N_{\text{Li}}^0 - N_{\text{H}}^k}{N_{\text{Li}}^0} k_{\text{прил}} \Psi \frac{RT \Delta t}{V_{\text{кам}}} \right]}{N_{\text{Li}}^0} \Delta t S_0 \Psi k_{\text{прил}} (N_{\text{Li}}^0 - N_{\text{H}}^i) - \Delta t \chi N_{\text{H}}^i - N_{\text{He}} \Delta t - N_{\text{T}} \Delta t, \quad (7)$$

где учтено изменение концентрации атомов водорода и его изотопов на поверхности жидкого лития, вызванное взаимодействием образовавшихся гидридов с ионами трития и гелия.

<sup>6</sup> К.Н. Мухин. Экспериментальная ядерная физика. В 3-х тт. СПб.: Издательство «Лань», 2008. Т.1

В ходе анализа полученных данных определено, что главным фактором выявленного эффекта увеличения скорости сорбции водорода жидким литием при нейтронном облучении является ускорение конвективных потоков в жидком металле. Для понимания этого эффекта было проведено моделирование. Для описания тепло- и массопереноса при нагреве образцов использовалась комбинированная система гидро-тепло динамики, реализованной в пакете ПО Comsol Multiphysics. Уравнения, используемые интерфейсом ламинарного потока Comsol Multiphysics, являются уравнениями Навье-Стокса для сохранения импульса (8) и уравнение непрерывности для сохранения массы (9) для нестационарного режима<sup>7</sup>.

$$\rho \frac{du}{dt} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot \left[ -\rho I + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot u)I \right] + \rho g, \quad (8)$$

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho u) = 0. \quad (9)$$

Для стационарного режима уравнения (8) и (9) записываются в виде:

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot \left[ -\rho I + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot u)I \right] + \rho g, \quad (10)$$

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0.$$

Где,  $\nabla$  - векторный оператор набла,  $\rho$  - плотность,  $u$  – поле скоростей;  $p$  – давление;  $\mu$  - динамическая вязкость,  $g$  – гравитационная постоянная. Так как это жидкость, то для учета выталкивающих сил, создающих конвекционный перенос в модель включена гравитация. Полагаем, что  $\rho$  и  $\mu$  зависят от температуры  $T$ , которая описывается уравнениями теплопереноса в жидкости, приведёнными для нестационарного (11) и стационарного режима (12), соответственно.

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} + \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q, \quad (11)$$

$$q = -k\nabla T.$$

$$\rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q, \quad (12)$$

$$q = -k\nabla T.$$

Где,  $C_p$  – теплоемкость,  $k$  - теплопроводность жидкости,  $Q$  – источник тепла (тепло, вызванное реакторным облучением).

Результаты моделирования для жидкого лития приведены на рисунках 10 и 11.

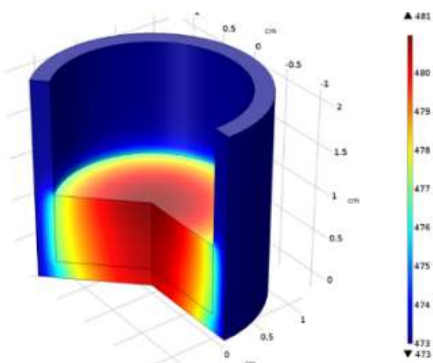


Рисунок 10. Температурное распределение по ячейке с образцом (мощность реактора 2 МВт, температура стенки ~200 °С)

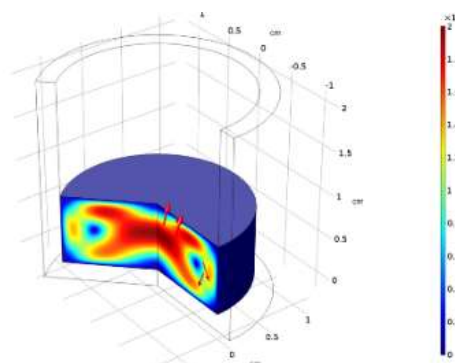


Рисунок 11. Распределение потоков жидкого лития в образце (мм/с) (мощность реактора 2 МВт, температура стенки АУ 200 °С)

<sup>7</sup> Буркова Е. Н. Система автоматизированных расчетов Comsol [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Е. Н. Буркова, А. Н. Кондрашов, К. А. Рыбкин // Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Электрон. дан. – Пермь, 2019. – 9,88 Мб; 133 с.

Моделирование показало, что, в экспериментах с жидким литием присутствует заметный градиент температур по литию, а также наблюдается конвективное движение жидкого лития по объему ячейки со скоростями ~ от 1 мм/с до 10 мм/с. Полученные зависимости приведены на рисунке 12.

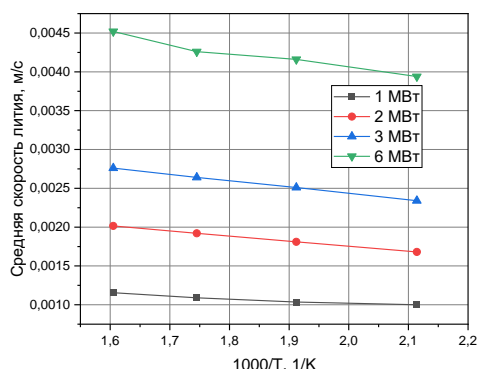
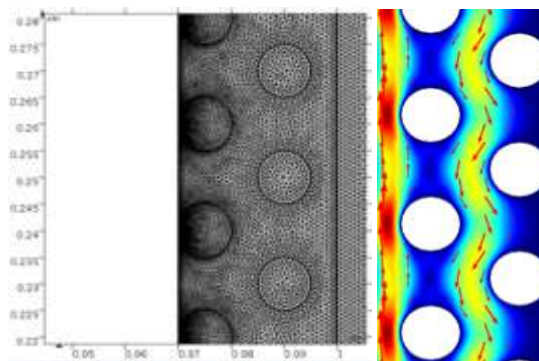


Рисунок 12. Зависимость средней скорости движения лития в ячейке от температуры на различных мощностях реактора



модель КПС сеточное разбиение

Рисунок 13. Распределение потоков жидкого лития в КПС при температуре 350 °C на мощности реактора 2 МВт (справа)

На рисунке 12 видно существенное увеличение скоростей движения жидкого лития в ячейке при повышении мощности реактора, которые подобны рассчитанным скоростям сорбции водорода. Подобное моделирование было проведено и для экспериментов с литиевой КПС. На рисунке 13 приведено характерное распределение конвекционных потоков жидкого лития во фрагменте литиевой КПС. Моделирование показало, что скорости потоков жидкого лития в КПС составляют ниже  $10^{-5}$  м/с, и эти значения существенно ниже (более чем на 2 порядка) значений, полученных в экспериментах с жидким литием.

По результатам моделирования были корректно интерпретированы данные, полученные в экспериментах по сорбции изотопов водорода жидким литием в условиях реакторного облучения и выявлено существенное различие в параметрах констант взаимодействия для образцов жидкого лития и литиевой КПС, что подтверждает предположение о влиянии на процессы сорбции конвективных потоков в жидком литии.

Также в четвертой главе приводится анализ результатов серии экспериментов по исследованию генерации и выделения трития из жидкого лития в условиях реакторного облучения. На рисунке 14 графически приставлены механизмы взаимодействия жидкого лития с изотопами водорода.

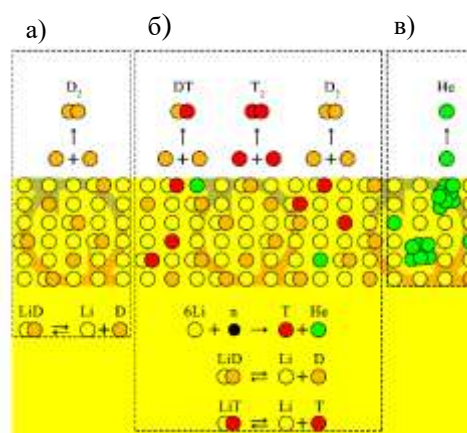


Рисунок 14. Общая схема взаимодействия лития с изотопами водорода: а) при насыщении дейтерием; б) наработка и выход трития из лития при облучении; в) наработка и выход гелия из лития при облучении

Процессы, происходящие на поверхности жидкого лития в его объеме, описываются следующим образом: а) адсорбция молекул дейтерия на поверхности, диссоциация молекул на атомы; растворение атомов дейтерия с поверхности в объем и частичный захват атомами лития атомов дейтерия ( $\text{Li}+\text{D}\leftrightarrow\text{LiD}$ ); б) генерация и выход атомов трития и гелия, рожденных в результате реакции ядер  ${}^6\text{Li}$  с тепловыми нейтронами, обратимое взаимодействие трития с атомами лития, выход на поверхность атомов трития, гелия и дейтерия, предварительно растворенного в образце из приповерхностного слоя, ассоциация в молекулы на поверхности лития атомов D и T, десорбция молекул  $\text{D}_2$ ,  $\text{DT}$ ,  $\text{T}_2$  с поверхности жидкого лития; в) ионы гелия, родившиеся в результате ядерных реакций, образуют агломерации (пузырьки), которые выходят на поверхность жидкого лития и уходят с нее без какого-либо взаимодействия (безактивационно).

В ходе анализа экспериментальных данных была выполнена оценка качественного состава выделяющихся из лития тритийсодержащих молекул при нейтронном облучении в зависимости от температуры исследуемого образца (рисунки 15, 16).

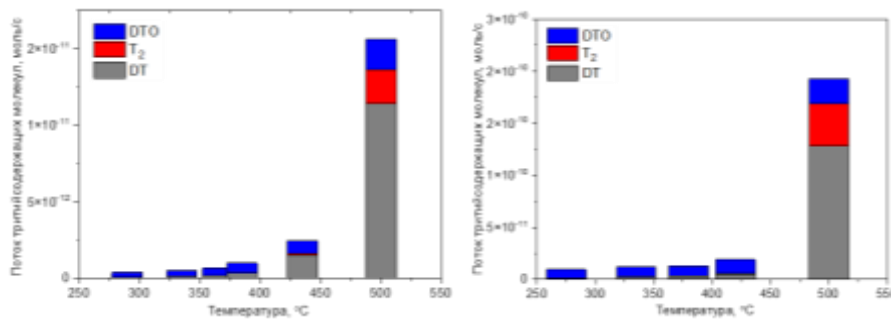


Рисунок 15. Поток молекул, содержащих тритий, из жидкого лития в зависимости от температуры и времени на различной мощности реактора: 2 МВт (слева); 6 МВт (справа)

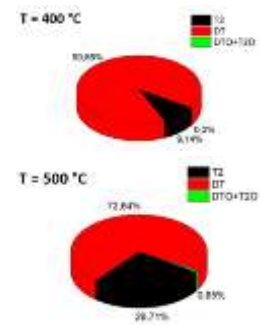


Рисунок 16. Вклад отдельных молекул в общее выделение трития из лития

По полученным зависимостям, определено, что выход трития, нарабатываемого в литии в процессе нейтронного облучения, происходит в виде молекул  $\text{DT}$  (а.е.м 5),  $\text{T}_2$  (а.е.м. 6) и  $\text{DTO}$  (а.е.м 21).

Количество сгенерированного в реакторных экспериментах трития (гелия) за время  $t$  рассчитывалось согласно выражению:

$$N(t) = R_{tot} \cdot t, \quad (13)$$

где,  $R_{tot}$  – среднее значение скорости образования трития в образце жидкого лития (моль/с);  $t$  – время облучения при температуре  $T$ .

Количество образовавшихся молекул трития (приведенных к  $\text{T}_2$ ) и атомов гелия рассчитывалось с использованием следующих уравнений:

$$\begin{aligned} N_{\text{нар}}^{\text{T}} &= \frac{R_{tot}}{2} \cdot t, \\ N_{\text{нар}}^{\text{He}} &= R_{tot} \cdot t, \end{aligned} \quad (14)$$

Общее количество трития, выделяющегося из жидкого лития при заданной температуре за определенное время облучения, определялось по формуле:

$$N_{\text{выд}}^{\text{T}} = \frac{N_{\text{DT}}}{2} + N_{\text{T}_2} + \frac{N_{\text{DTO}}}{2}, \quad (15)$$

где,  $N_{\text{DT}}$ ,  $N_{\text{T}_2}$  и  $N_{\text{DTO}}$  – количество выделившегося газа, моль равно интегралу под кривой



Далее в работе приводятся расчеты коэффициентов эффективности выхода трития и гелия из жидкого лития в зависимости от температуры образца и нейтронного потока. Коэффициент эффективного выделения рассчитывался с помощью следующей формулы:

$$K(T) = \frac{N_{\text{выд}}(T)}{N_{\text{нар}}(T)}, \quad (16)$$

где,  $K(T)$  – коэффициент эффективного выделения при температуре образца  $T$ ;  $N_{\text{выд}}(T)$  – количество выделившегося из образца трития (гелия) при температуре  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) и за время  $t$  (с);  $N_{\text{нар}}(T)$  – количество наработанного трития (гелия) за время  $t$  (с)

На рисунке 17 представлены температурные зависимости рассчитанных коэффициентов эффективности выделения трития и гелия из жидкого лития в процессе реакторного облучения.

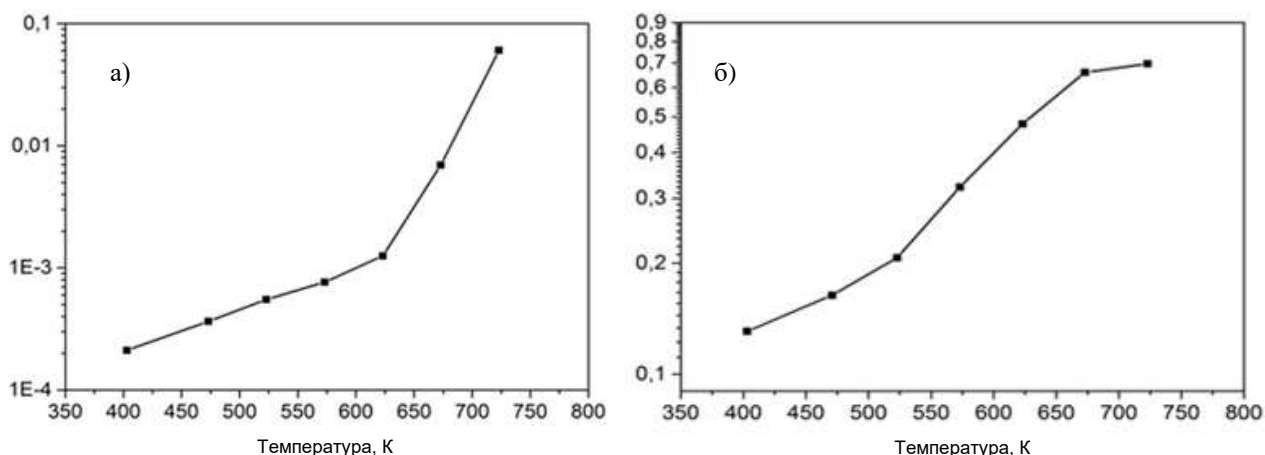


Рисунок 17. Зависимость коэффициента эффективности выделения газов из образца жидкого от температуры при реакторном облучении: а) трития; б) гелия

На рисунке 18 приведена Аррениусовская зависимость коэффициента эффективности выделения трития из жидкого лития в процессе реакторного облучения.

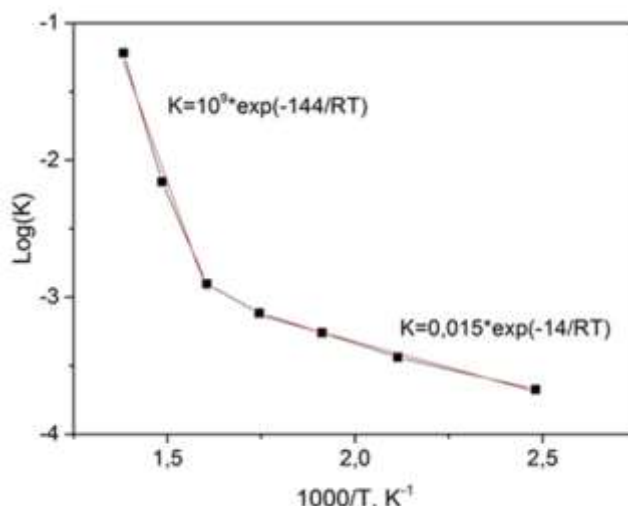


Рисунок 18. Аррениусовская зависимость коэффициента эффективности выделения трития из образца лития в процессе реакторного облучения

Полученные зависимости качественно свидетельствует о том, что при температуре около  $350$   $^{\circ}\text{C}$  изменяется механизм выделения трития. Изменение механизма выделения трития, по-видимому, свидетельствует о смещении равновесия в обратимых реакциях  $\text{LiD} \leftrightarrow \text{Li} + \text{D}$  и  $\text{LiT} \leftrightarrow \text{Li} + \text{T}$  в правую сторону. Такой эффект связан с диссоциацией гидридных фаз.

При этом нужно учитывать, что плотность, динамическая вязкость и коэффициент поверхностного натяжения в самой литии **падают** с увеличением температуры, что может тоже влиять на рост коэффициента диффузии трития в литии. Выявлено, что процесс образования и распада тритида лития зависит от температуры, что обусловлено увеличением константы скорости распада в аррениусовской зависимости.

Далее для моделирования процессов наработки и выхода гелия и трития из жидкого лития было записано уравнение переноса атомов гелия и трития в приповерхностном слое с учетом конвективных потоков перемешивания жидкого лития.

Выражение переноса для гелия в поверхностном слое, для одномерного случая, будет иметь следующий вид<sup>8</sup> :

$$\Phi(x, t)_{He} = D_{He} \cdot \frac{\partial C(x, t)_{He}}{\partial x} + K_{He} \cdot R_{He}. \quad (17)$$

где  $R_{He}$  – скорость генерации ионов гелия в приповерхностном слое при реакторном облучении, моль/с;  $C(x, t)_{He}$  – концентрация ионов гелия в образце моль/см<sup>3</sup>;  $D_{He}$  – эффективная константа переноса ионов гелия, м<sup>2</sup>/с;  $K_{He}$  – константа эффективности наработки и выделения атомов трития, образовавшихся в приповерхностном слое в результате реакции  $Li^6(n, \alpha)H^3$ .

Взаимодействие атомов лития с гелием можно не учитывать, так как гелий обычно нейтрален для любых взаимодействий, в то же время ионы трития эффективно взаимодействуют с атомами лития.

Общее выражение переноса ионов трития в поверхностном слое, для одномерного случая, будет иметь вид<sup>9</sup>:

$$\begin{aligned} \Phi(x, t)_T &= D_T \cdot \frac{\partial C(x, t)_T}{\partial x} + K_T \cdot R_T - k_{cap} \cdot C(x, t)_T + k_{rel} \cdot C_{trap}(x, t)_T, \\ \frac{\partial C(x, t)_T}{\partial x} &= k_{cap} \cdot C(x, t)_T - k_{rel} \cdot C_{trap}(x, t)_T. \end{aligned} \quad (18)$$

где,  $R_T$  – скорость генерации ионов трития в приповерхностном слое лития при нейтронном облучении, моль/с;  $C(x, t)_T$  – концентрация атомов трития моль/см<sup>3</sup>;  $D_T$  – эффективная константа переноса (коэффициент диффузии) атомов трития м<sup>2</sup>/с;  $k_{cap}$  – константа захвата трития литием, 1/с;  $K_T$  – константа эффективности генерации и выделения атомов трития, образовавшихся в приповерхностном слое лития в результате реакции  ${}^6Li(n, \alpha){}^3H$ ;  $C_{trap}(x, t)_T$  – концентрация тритида лития (LiT) моль/см<sup>3</sup>;  $k_{rel}$  – константа выделения трития из тритида лития (LiT), 1/с.

Нужно заметить, что выражения для переноса трития в литии соответствуют процессам переноса в присутствии ловушек неограниченной емкости, так как изменение концентрации свободных атомов лития в образце за время экспериментов практически не изменяется.

С помощью системы уравнений (18) было выполнено моделирование процессов выделения трития из жидкого лития. Температурная зависимость свободных атомов трития в жидком литии и сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования приведены на рисунке 19.

<sup>8</sup> Заурбекова, Ж. А. Исследование процессов генерации и выделения трития и гелия из свинцово-литиевой эвтектики в условиях реакторного облучения / Ж. А. Заурбекова и др. // Ядерная физика и инжиниринг, 2017, том 8, № 1, с. 38-47.

<sup>9</sup> Заурбекова Ж.А. Исследование наработки трития и гелия в литийсодержащих материалах и их выделения / Ж.А. Заурбекова и др. // ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез. – 2018.– Том 41. Выпуск № 4.– С. 14-25.

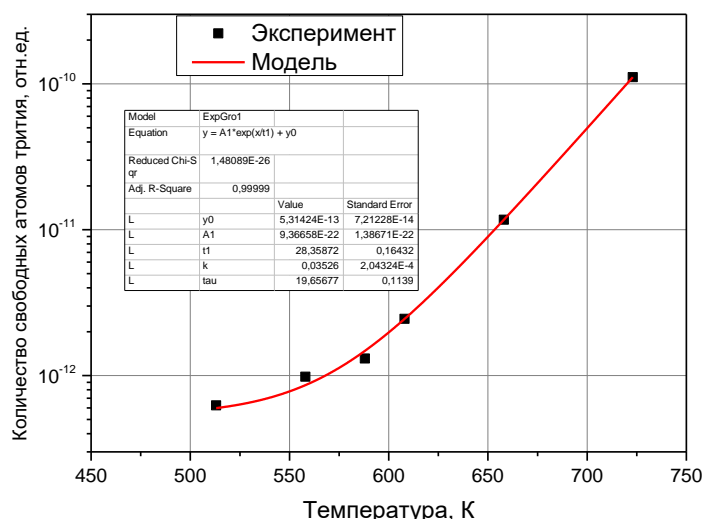


Рисунок 19. Зависимость относительной концентрации свободных атомов трития образующихся в жидком литии при реакторном облучении от температуры

Зафиксировано, что увеличение концентрации свободных атомов трития в жидком литии зависит от температуры и количество атомов трития растет экспоненциально, что соответствует постоянству скорости распада тритида лития в аррениусовской зависимости.

По результатам анализа реакторных экспериментов с жидким литием были сделаны следующие основные выводы: из-за инертности гелий не взаимодействует с атомами лития, а характер выхода его атомов на поверхность и ухода с нее имеет безактивационный характер и заметно превышает значения выделения атомов трития из лития (физисорбция –  $He$  и хемосорбция –  $T$ ). На выход гелия из лития при облучении существенное влияние оказывает неравномерность энерговыделения по образцу, что на общем уровне стационарного потока гелия из образца приводит к появлению острых пиков. Наблюдаемые пики выделения можно объяснить взрывным выходом гелия из образца в виде пузырьков, образование которых вызваны процессом конвективного перемешивания жидкого лития по всей глубине пробега и термализации нейтронов. Что касается трития то основным преобладающим процессом, влияющим на механизмы выхода трития из жидкого лития, является обратимая реакция образования и распада тритида лития. При увеличении температуры исследуемого образца повышается скорость выхода трития из лития, что вызвано увеличением скорости распада тритида лития, при том же уровне захвата трития атомами лития.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Созданы облучательные ампульные устройства с исследовательскими образцами лития. По результатам нейтронно-физических и теплофизических расчетов выбраны и обоснованы режимы проведения реакторных экспериментов с жидким литием.
2. С использованием адсорбционного, масс-спектрометрического анализа и метода термостимулированной десорбции были разработаны методики проведения экспериментов по исследованию взаимодействия изотопов водорода с жидким литием в условиях нейтронного облучения на исследовательском реакторе ИВГ.1М, выполнена их апробация посредством проведения методических экспериментов.
3. Получены новые экспериментальные данные о влиянии реакторного излучения на параметры насыщения жидкого лития изотопами водорода из газовой фазы и последующего их выделения в зависимости от температуры, давления насыщения и нейтронного потока. Установлено, что существенное влияние на процессы сорбции/десорбции оказывают

конвективные потоки в жидком металле, возникающие из-за локальных перегревов в результате реакций ядер лития-6 с тепловыми нейтронами ( ${}^6\text{Li} + n \rightarrow \text{T} + {}^4\text{He} + 4,79 \text{ МэВ}$ ).

4. Получены новые экспериментальные данные по генерации и выделению трития из жидкого лития в условиях реакторного облучения при различных нейтронных потоках и температурах исследуемого образца. Обнаружено экспоненциальное увеличение концентрации свободных атомов трития в литии в условия нейтронного излучения при повышении температуры образца и установлено, что процесс выделения трития из жидкого лития во время облучения до температуры 350 °С происходит в виде молекулы DT и DTO, а при повышении температуры вплоть до 800 °С выделение происходит дополнительно в виде молекулы T<sub>2</sub>.

5. Разработаны модели, описывающие механизмы воздействия нейтронного излучения на параметры сорбции (десорбции) изотопов водорода жидким литием и на процессы генерации и выхода трития из лития. Определены константы взаимодействия изотопов водорода с литием, определены температурные зависимости скорости потоков жидкого лития в образце при различных мощностях реактора, построена Аррениусовская зависимость коэффициента эффективности выделения трития из лития в процессе реакторного облучения и определены коэффициенты эффективности выделения гелия и трития из жидкого лития в процессе реакторного облучения, рассчитана энергия активации высвобождения трития из ловушек (распад тритида) при температуре выше 500 °С, которая составила порядка 16 кДж/моль.

### СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

1. Тажибаева, И.Л. Определение параметров взаимодействия изотопов водорода с жидким литием и литиевой капиллярно-пористой системой в условиях реакторного облучения / И.Л. Тажибаева, Т.В. Кульсартов, Ю.Н. Гордиенко, Ж.А. Заурбекова, Ю.В. Понкратов, Н.И. Барсуков, Е.Ю. Тулубаев, В.В. Бакланов, В.С. Гныря, Е.А. Кенжин // Вопросы атомной науки и техники, Сер. Термоядерный синтез. – 2013. – Выпуск № 4. – С. 25-38. DOI: 10.21517/0202-3822-2013-36-4-25-38
2. Гордиенко, Ю.Н. Применение метода водородопроницаемости реакторных экспериментах по исследованию взаимодействия изотопов водорода с конструкционными материалами / Ю.Н. Гордиенко, Т.В. Кульсартов, Ж.А. Заурбекова, Ю.В. Понкратов, В.С. Гныря, Н.Н. Никитенков // Известия Томского политехнического университета: Математика и механика. Физика. 2014. Т. 324. № 2. С. 149-162.
3. Ponkratov, Yu. V. Methodology of the experiments to study lithium cps interaction with deuterium under conditions of reactor irradiation / Yu. V. Ponkratov, N. N. Nikitenkov, I. L. Tazhibayeva, Zh. A. Zaurbekova, V. S. Gnyrya, K. K. Samarkhanov, I. E. Lyublinski, G. Mazzitelli // Eurasian Chemico-Technological Journal. – 2019. – V. 21, № 1. – P. 107-113. DOI:10.18321/ectj820.
4. Tazhibayeva Irina. Results of reactor irradiation of liquid lithium saturated with deuterium / Irina Tazhibayeva, Yuriy Ponkratov, Timur Kulsartov, Yuriy Gordienko, Mazhyn Skakov, Zhanna Zaurbekova, Igor Lyublinski, Alexey Vertkov, Giuseppe Mazzitelli // Fusion Engineering and Design. – 2017. – V. 117. – P. 194-198. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2016.06.057.
5. Kulsartov, T. Investigation of hydrogen isotopes interaction with lithium CPS under reactor irradiation // T. Kulsartov, I. Tazhibayeva, Yu. Ponkratov, Yu. Gordienko, Zh. Zaurbekova, V. Baklanov, Ye. Chikhray, M. Skakov, Ye. Koyanbayev, A. Korovikov, E. Nesterov // Fusion Engineering and Design. – 2017. – V. 124. – P. 324-327. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2017.03.135.
6. Tazhibayeva, I. Study of properties of tungsten irradiated in hydrogen atmosphere / I. Tazhibayeva, M. Skakov, V. Baklanov, E. Koyanbaev, A. Miniyazov, T. Kulsartov, Y. Ponkratov, Y. Gordienko, and Z. Zaurbekova // Nuclear Fusion. – 2017. – V. 57, № 12. 126062. DOI:10.1088/1741-4326/aa7911.
7. Заурбекова, Ж. А. Исследование процессов генерации и выделения трития и гелия из свинцово-литиевой эвтектики в условиях реакторного облучения / Ж. А. Заурбекова, А. А. Ситников, В. Ю.

- Филимонов, Т. В. Кульсартов, Ю. Н. Гордиенко, Ю. В. Понкратов, М. К. Скаков // *Ядерная физика и инжиниринг*, 2017, том 8, № 1, с. 38-47. DOI: 10.1134/S2079562917010250.
8. Заурбекова, Ж.А. Исследование наработки трития и гелия в литийсодержащих материалах и их выделения (обзор) / Ж.А. Заурбекова, А.А. Ситников, Т.В. Кульсартов, И.Л. Тажибаева, Ю.В. Понкратов, В.С. Гныря, Г. Кизане // *Вопросы атомной науки и техники, Сер. Термоядерный синтез.* – 2018.– Том 41. Выпуск № 4.– С. 14-25. DOI: 10.21517/0202-3822-2018-41-4-14-25.
9. Kulsartov, T. Study of tritium and helium generation and release from lead-lithium eutectics Li15.7Pb under neutron irradiation / Timur Kulsartov, Zhanna Zaurbekova, Irina Tazhibayeva, Yuriy Ponkratov, Vyacheslav Gnyrya, Gunta Kizane, Evgeny Nesterov, Natalia Varlamova // *Fusion Engineering and Design.* – 2019. – V. 146. – P.1317-1320. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2019.02.066.
10. Tazhibayeva, I.L. Reactor studies of hydrogen isotopes interaction with lithium CPS using dynamic sorption technique / I.L. Tazhibayeva, Yu.V. Ponkratov, T.V. Kulsartov, Yu.N. Gordienko, Zh.A. Zaurbekova, V.S. Gnyrya, Ye.V. Chikhray, S.K. Askerbekov, A.V. Vertkov, I.Ye. Lyublinski, G. Mazzitelli // *Fusion Engineering and Design.* – 2019. – V. 146. – P.402-405. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2018.12.077.
11. Gordienko, Yu. Research facilities of IAE NNC RK (Kurchatov) for investigations of tritium interaction with structural materials of fusion reactors / Yu. Gordienko, Yu. Ponkratov, T. Kulsartov, Zh. Zaurbekova, Ye. Koyanbayev, Ye. Chikhray // *Fusion Science and Technology.* – 2020. – V. 76, Is. 6. – P. 703-709. DOI: 10.1080/15361055.2020.1777667.
12. Kulsartov, T.V. In-situ determination of parameters of hydrogen isotopes interaction with materials using dynamic sorption/desorption method / T.V. Kulsartov, Zh.A. Zaurbekova, Yu.V. Ponkratov, V.S. Gnyrya // *Fusion Science and Technology.* – 2020. – V. 76, Is. 3. – P. 333-340 DOI: 10.1080/15361055.2020.1712006.
13. Люблинский, И.Е. Стационарно работающие литиевые внутрикамерные элементы ТОКАМАКА / И.Е. Люблинский, А.В. Вертков, М.Ю. Жарков, А.В. Берлов, М.А. Ладько, С.В. Мирнов, В.Б. Лазарев, В.А. Вершков, Г.Е. Ноткин, А.В. Захаренков, И.Л. Тажибаева, Ю.В. Понкратов, Ю.Н. Гордиенко // *Вопросы атомной науки и техники, Сер. Термоядерный синтез.* – 2020.– Том 43. Выпуск № 1.– С. 55-63. DOI: 10.21517/0202-3822-2020-43-1-55-63.
14. Vertkov, A. V. New version of the KTM lithium divertor / A. V. Vertkov, M. Yu. Zharkov, I. E. Lyublinski, A. V. Berlov, I. L. Tazhibayeva, Yu. V. Ponkratov and Yu. N. Gordienko // *Physics of Atomic Nuclei.* – 2020. – V. 83, No. 7. – P. 1-8. DOI: 10.1134/S1063778820070121.
15. Tazhibayeva, I.L. Reactor studies of tritium release from lead-lithium eutectic Li15.7Pb with deuterium over the sample / I.L. Tazhibayeva, T.V. Kulsartov, Y.V. Baklanova, Zh.A. Zaurbekova, Y. Gordienko, Y. V. Ponkratov // *Nuclear Materials and Energy.* – 2020. –V. 25:100868. DOI: 10.1016/j.nme.2020.100868.
16. Lyublinski, I. E. Stationary Operated Lithium In-Vessel Elements of a Tokamak / I. E. Lyublinski, A. V. Vertkov, M. Yu. Zharkov, A. V. Berlov, M. A. Ladyko, S. V. Mirnov, V. B. Lazarev, V. A. Vershkov, G. E. Notkin, A. V. Zakharenkov, I. L. Tazhibayeva, Yu. V. Ponkratov, Yu. N. Gordienko // *Physics of Atomic Nuclei*, 2021, Vol. 84, No. 7, p. 1-7. DOI: 10.1134/S1063778821070085.
17. Askerbekov, S. Analysis of reactor experiments to study the transfer processes of generated tritium in lithium CPS (capillary-porous system) / S. Askerbekov, I. Kenzhina, T. Kulsartov, Ye. Chikhray, I. Tazhibayeva, Yu. Ponkratov, Yu. Gordienko, Zh. Zaurbekova, M. Gabdullin, K. Kadyrzhanov, E. Nesterov // *International Journal of Hydrogen Energy.* – 2022. – V.47, Is.11. – P.7368-7378. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.03.163.
18. Kulsartov Timur. Investigation of hydrogen and deuterium impact on the release of tritium from two-phase lithium ceramics under reactor irradiation / Timur Kulsartov, Yergazy Kenzhina, Regina Knitter, Gunta Kizane, Yevgeny Chikhray, Asset Shaimerdenov, Saulet Askerbekov, Assyl Akhanov, Inesh Kenzhina, Zhanna Zaurbekova, Arturs Zarins, Darkhan Sairanbayev, Yuriy Gordienko, Yuriy Ponkratov // *Nuclear Materials and Energy.* – 2022. –V. 30:101115. DOI: 10.1016/j.nme.2022.101115.
19. Kulsartov Timur. Studies of two-phase lithium ceramics Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>-Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub> under conditions of neutron irradiation/ Timur Kulsartov, Zhanna Zaurbekova, Regina Knitter, Asset Shaimerdenov, Yevgeny Chikhray,

- Saulet Askerbekov, Assyl Akhanov, Inesh Kenzhina, Gunta Kizane, Yergazy Kenzhin, Magzhan Aitkulov, Darkhan Sairanbayev, Yuriy Gordienko. Yuriy Ponkratov // Nuclear Materials and Energy. – 2022. –V. 30:101129. DOI: 10.1016/j.nme.2022.101129.
20. Tazhibayeva, I. Study of liquid tin-lithium alloy interaction with structural materials of fusion reactor at high temperatures // I. Tazhibayeva, Yu. Ponkratov, I. Lyublinsky, Yu. Gordienko, A. Vertkov, Ye. Tulubayev, K. Samarkhanov, V. Bochkov, Ye. Kozhakhmetov, N. Orazgaliyev // Nuclear Materials and Energy. – 2022. –V. 30:101152. DOI: 10.1016/j.nme.2022.101152.
21. Tulubayev Yevgeniy. Development of a methodology for conducting experiments with a sample of lithium capillary-porous structure at a plasma-beam installation / Yevgeniy Tulubayev, Yuriy Ponkratov, Yuriy Gordienko, Nikolay Nikitenkov, Igor Sokolov, Gainiya Zhanbolatova, Vadim Bochkov // Materials Today: Proceedings. – 2023. – V. 81, Is. 3. – P. 1209-1215. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.03.176.
22. Bochkov Vadim. Development of a methodology for conducting experiments with a sample of tin-lithium eutectic at a plasma-beam installation / Vadim Bochkov, Yuriy Ponkratov, Yuriy Gordienko, Kuanysh Samarkhanov, Yevgeniy Tulubayev, Timur Tulenbergenov, Igor Sokolov, Yekaterina Martynenko // Materials Today: Proceedings. – 2022. – V. 81, Is. 3. – P. 1198-1203. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.11.431.
23. Понкратов Ю.В., Скаков М.К., Абдуллин Х.А., Бакланов В.В., Барсуков Н.И., Гордиенко Ю.Н., Заурбекова Ж.А., Кульсартов Т.В., Чихрай Е.В. Способ изготовления исследовательских образцов литиевой капиллярно-пористой структуры // Патент РК на полезную модель № 2716, Бюллетень №15, опубл. 23.04.2018.
24. Понкратов Ю.В., Тажибаева И.Л., Барсуков Н.И., Гордиенко Ю.Н., Заурбекова Ж.А., Карамбаева И.С. Устройство очистки и заливки эвтектики // Патент РК на изобретение №34277., Бюллетень №32, опубл. 14.08.2020.
25. Понкратов Ю.В., Скаков М.К., Барсуков Н.И., Гордиенко Ю.Н., Заурбекова Ж.А., Карамбаева И.С., Гныря В.С. Ампульное устройство для исследования тритийгенерирующих материалов // Патент РК на полезную модель №4912, Бюллетень №18, опубл. 06.05.2020.
26. Понкратов Ю. В., Тажибаева И. Л., Гордиенко Ю. Н., Бочков В. С., Тулубаев Е. Ю., Карамбаева И. С., Самарханов К. К. Ампульное устройство для изготовления образцов оловянно-литиевого сплава // Патент РК на полезную модель №6918, Бюллетень №9, опубл. 04.03.2022.