

Министерство энергетики Республики Казахстан
Республиканское государственное предприятие на праве хозяйственного ведения
«Национальный ядерный центр Республики Казахстан»
филиал «Институт атомной энергии»

На правах рукописи



Понкратов Юрий Валентинович

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

1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико –математических наук

Научный руководитель:
доктор физико –математических наук,
профессор Никитенков Николай Николаевич

Курчатов – 2023

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Аналитический обзор о свойствах лития и его применении в установках управляемого термоядерного синтеза.....	14
1.1 Основные свойства лития.....	14
1.2 Концепция применения лития в ТЯР.....	29
1.3 Исследования по взаимодействию изотопов водорода с литийсодержащими материалами в условиях нейтронного излучения.....	43
1.4 Постановка задачи.....	47
Глава 2. Техника и методы проведения реакторных экспериментов.....	49
2.1 Исследовательский ядерный реактор и экспериментальный стенд....	49
2.2 Устройства для проведения реакторных экспериментов с литием.....	56
2.3 Методики проведения реакторных экспериментов.....	70
Глава 3. Проведение реакторных экспериментов.....	86
3.1 Эксперименты по определению параметров сорбции изотопов водорода жидким литием в условиях реакторного облучения.....	86
3.1.1 Реакторные эксперименты с литиевой КПС.....	86
3.1.2 Реакторные эксперименты с жидким литием.....	89
3.2 Эксперименты по исследованию генерации и выделения трития из жидкого лития в условиях реакторного облучения.....	93
Глава 4. Обработка и анализ полученных результатов.....	100
4.1 Анализ результатов экспериментов по определению параметров сорбции изотопов водорода жидким литием в условиях реакторного облучения.....	100
4.2 Анализ результатов экспериментов по исследованию генерации и выделения трития из жидкого лития в условиях реакторного облучения....	106
4.3 Моделирование процессов сорбции изотопов водорода жидким литием и процессов генерации и выхода трития из лития в условиях реакторного облучения.....	112
Заключение.....	119

Список использованных источников	121
--	-----

Введение

Актуальность работы. 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. Дор 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 установок управляемого термоядерного синтеза (УТС) 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/м² до 10 МВт/м², то 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 плазменного шнура и возникновение электромагнитных возмущений на периферии плазмы (так называемых ЭЛМ-ов), 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 литий, особенно перспективно применение лития в жидкой фазе. Имеющийся на сегодняшний момент опыт использования литиевых технологий в термоядерных установках показал, что применение лития в качестве ОПМ в будущих ТЯР [1 – 3] 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; позволит повысить плазменные параметры термоядерных реакторов за счет уменьшения эффективного зарядового числа плазмы близкого к единице; способность жидкого лития самообновлять поверхность взаимодействующую с плазмой позволит разработать внутрикамерные устройства нового типа с приемной поверхностью, обладающих практически неограниченным ресурсом; обеспечить лимитированное присутствие в плазме продуктов эрозии ОПМ что уменьшит накопление в материалах реактора радиоактивного изотопа водорода – трития [4].

Однако для того, чтобы окончательно обосновать высокую перспективность использование 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 с при воздействии нейтронного излучения являются актуальными.

Степень разработанности темы

До настоящего момента, в мире неоднократно на действующих токамаках проводились эксперименты с применением жидкого лития в качестве внутрикамерных элементов [5 – 11]. 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, C. 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 (Фраскатти, Италия). В обоих случаях в плазменных 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 – тритиевой 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 LTX (Принстон, США). На NSTX проводились эксперименты с полностью литиевым дивертором, в экспериментах на LTX первая стенка была покрыта жидким литием (порядка 90%). Эксперименты с литиевым лимитером на основе капиллярно – пористой структуры (КПС) и литиизация 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. То есть при изменении тепловых и радиационных нагрузок ($D-D$ и $D-T$ реакции) на внутрикамерные элементы, содержащие литий, плотность пристеночной плазмы в термоядерном реакторе может как резко падать, при захвате изотопов водорода, так и резко возрастать при высвобождении изотопов водорода. Изучению этих процессов было посвящено много работ, проведенных на действующих токамаках и плазменно-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 изотопов водорода с жидким литием найти не удалось. Наряду с исследованием процессов транспорта изотопов водорода в литии, отдельным направлением является изучение механизмов генерации и выделения трития из лития в жидкой фазе. Во многих случаях реакторные эксперименты по генерации трития проводились, но это были облучение литиевой керамики и свинцово-литиевой эвтектики. Но данных по генерации и выделения трития из лития в жидкой фазе при нейтронном облучении очень ограниченное количество, и они отличаются противоречивыми допущениями. Отсюда следует что имеется проблема, связанная с выявлением механизмов и разработкой моделей, позволяющих

описать процессы сорбции (десорбции) изотопов водорода жидким литием, а также наработки и выделения трития из лития в жидкой фазе в процессе нейтронного облучения. Для решения обозначенной проблемы в филиале ИАЭ НЯЦ РК имеется база исследовательских ядерных реакторов и научный задел [12 – 19], что позволяет проводить экспериментальные исследования по данному направлению.

В связи с этим **цель настоящей работы** состояла в исследовании 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.

Для достижения этой цели были поставлены **следующие задачи**:

1. Создание облучательных устройств для проведения экспериментов на исследовательском реакторе ИВГ.1М., расчетное обоснование конструкции этих устройств, выбор и обоснование режимов проведения экспериментов.

2. Разработка и верификация методик проведения реакторных экспериментов с образцами жидкого лития.

3. Проведение реакторных экспериментов по исследованию закономерностей сорбции (десорбции) изотопов водорода жидким литием в зависимости от величин нейтронного потока и температуры исследуемых образцов.

4. Проведение реакторных экспериментов по исследованию закономерностей генерации и выделения трития из жидкого лития при различных нейтронных потоках и температурах исследуемого образца.

5. Разработка модельных представлений о процессах сорбции/десорбции изотопов водорода литием в жидкой фазе в условиях нейтронного облучения, а также моделей описывающие механизмы выхода из жидкого лития трития, образовавшегося в результате ядерных реакций



Научная новизна

- Впервые проведены эксперименты по облучению жидкого лития с одновременной масс –спектрометрической регистрацией в реальном времени изменения парциального давления изотопов водорода над исследуемыми образцами.
- Впервые зарегистрированы изменения скорости сорбции (десорбции) жидким литием изотопов водорода в зависимости от нейтронного потока и температуры в условиях реакторного облучения.
- Впервые зарегистрированы изменения скорости выхода трития из жидкого лития в зависимости от нейтронного потока и температуры в условиях реакторного облучения.
- 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.

Теоретическая и практическая значимость работы

Описание процессов взаимодействия лития с изотопами водорода в условиях одновременного воздействия нейтронного облучения и высоких тепловых нагрузок дополняет имеющуюся базу данных о свойствах лития и об изменении свойств жидкого лития в условиях реальной работы в ТЯР. Полученные новые экспериментальные данные позволят расчетно – экспериментальным путем 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 заключается в следующем:

1. Развитие методик и экспериментальной базы для определения параметров взаимодействия изотопов водорода с конструкционными и

функциональными материалами ядерных и термоядерных установок в процессе реакторного облучения.

2. Использование полученных результатов при обосновании конструкции будущих термоядерных реакторов и их безопасной эксплуатации, а также и для других ядерно – энергетических установок, материалы которых будут работать в условиях одновременного воздействия изотопов водорода, тепловых нагрузок и ионизирующего излучения.

3. Возможность применения полученных экспериментальных данных для создания теоретических моделей поведения изотопов водорода в жидких металлах и сплавах в процессе облучения.

Методология и методы исследования

Для выполнения поставленных задач использовался исследовательский ядерный реактор ИВГ.1М с плотностью потока: по тепловым нейтронам – $3,5 \cdot 10^{14}$ н/см²·с; по быстрым нейтронам – $1,2 \cdot 10^{13}$ н/см²·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 ИВГ1.М 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++.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанные и апробированные 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, который 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. Установленный и описанный обратимый процесс образования – распада тритида лития (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 жидкого лития.

4. Обнаруженные 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.

Достоверность полученных 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 исследований жидкометаллических литийсодержащих материалов. Опубликованные в рейтинговых изданиях материалы по теме исследования и полученные патенты также свидетельствуют об достаточной апробации, подтверждающей достоверность полученных результатов.

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 экспериментах 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.

Апробация результатов 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, INESS 2020); 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 индексируемых системой РИНЦ). Четыре публикации представляют собой национальные патенты Республики Казахстан (из них один патент на изобретение и три патента на полезную модель).

Структура и объем работы

Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 129 страницах машинописного текста, содержит 68 иллюстраций, 20 таблиц и 49 формул. Список литературы состоит из 90 библиографических ссылок.

Глава 1. Аналитический обзор о свойствах лития и его применении в установках управляемого термоядерного синтеза

Проблема использования лития актуальна в вопросах, связанных с его применением в установках управляемого термоядерного синтеза в качестве материала, непосредственно контактирующего с высокотемпературной плазмой.

В обзоре рассматриваются основные свойства лития и концепция его применения в термоядерных реакторах. Приводится описание работ по применению на действующих плазмо – физических установках (ускорителях, токамаках, стеллараторах) лития и литиевых технологий. Описываются эксперименты по исследованию взаимодействия литийсодержащих материалов с изотопами водорода в условиях реакторного облучения, проводится анализ найденной информации по итогам которого формулируются и обозначаются задачи данной диссертационной работы.

1.1 Основные свойства лития

Применение лития с точки зрения возможности его применения как материала, контактирующего с плазмой, в качестве материала, воспроизводящего тритий, а также теплоносителя в blankets ТЯР (термоядерных реакторов) является перспективным [20 – 23]. К настоящему времени свойства лития изучены в достаточной степени [24 – 32]. Свойства лития во многом зависят от чистоты металла и вакуумных условий, в которых эти свойства определялись.

Важными свойствами лития являются его низкая температура плавления, которая составляет 180 °С и высокая температура кипения, которая составляет 1343 °С. Эти свойства определяют диапазон состояния лития в жидкой фазе, которые и обуславливают перспективные возможности использования в различных энергетических системах реакторов жидкого лития.

Атомная масса лития природного обогащения по изотопу ${}^6\text{Li}$ (порядка 7,42 %) составляет 6,941 а. е. м., и он самый легкий в группе металлов. Плотность лития природного обогащения при комнатной температуре составляет $0,5316 \text{ г/см}^3$, плотность изотопа ${}^6\text{Li}$ – $0,460 \text{ г/см}^3$, плотность изотопа ${}^7\text{Li}$ – $0,537 \text{ г/см}^3$.

Плотность лития в твердом состоянии в зависимости от температуры описывается следующим выражением:

$$d = 533 \cdot (1 + 1,8 \cdot 10^{-4} \cdot t)^{-1} \quad (1.1)$$

где d – плотность Li, кг/м^3 ; t – температура, ${}^\circ\text{C}$.

Теплота плавления лития составляет порядка 432,08 Дж/г. При плавлении объем Li увеличивается на 1,5 %. При температуре $25 \text{ }^\circ\text{C}$ коэффициент термического расширения лития равен $47 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$.

Выше температуры плавления лития изменение плотности описывается следующим уравнением:

$$d = 540,43 - 0,02729 \cdot (t + 273,2) - 8,0035 \cdot (t + 273,2)^2 \cdot 10^{-5} + 3,799 \cdot (t + 273,2)^3 \cdot 10^{-8}, \quad (1.2)$$

где d – плотность Li, кг/м^3 ; t – температура, ${}^\circ\text{C}$.

При повышении температуры лития с $25 \text{ }^\circ\text{C}$ до $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ удельный объем металла возрастает на 20 %, это следует учитывать при разработке инновационных литиевых систем термоядерных реакторов.

Значение коэффициента теплового излучения лития ϵ_t составляет 0,05 и это значение в значительной степени зависит от состояния поверхности лития.

Литий при температурах выше ($-200 \text{ }^\circ\text{C}$) имеет решётку объемно – центрированного куба (ОЦК). Валентная конфигурация лития – $2s - 2s_{1/2}$. При комнатной температуре литий имеет следующие механические свойства: коэффициент Пуассона – 0,42; модуль упругости – 5 ГПа; предел прочности – 115 ГПа; полное относительное удлинение – от 50% до 70%. При повышении температуры лития прочностные свойства металла резко падают, а

пластичность растет. Так как температура рекристаллизации лития ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) то при обработке Li волочением или прессованием упрочнения металла не происходит. Изотермическая сжимаемость при температуре лития $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет порядка $1,1 \cdot 10^{-10}$, при $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $1,5 \cdot 10^{-10}\text{ Па}^{-1}$. Потенциалы ионизации лития: I – 5,3918 эВ, II – 75,641 эВ и III – 122,45 эВ.

Термодинамические свойства паровой и конденсированной фазы лития определяются следующими параметрами.

Давление насыщенных паров жидкого лития в диапазоне температур от $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ описывается уравнением:

$$\lg P = 12,4037 - 8289,1/T - 0,7081 \cdot \lg T, \quad (1.3)$$

где P – давление насыщающих паров жидкого Li, Па; T – температура, К.

Рассчитанные давления насыщения паров лития в зависимости от температуры приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Давления насыщения литиевого пара при различных температурах

T, К	300	$T_{пл}$	500	600	700	800	1000	1200
P, Па	$9,81 \cdot 10^{-18}$	$2,41 \cdot 10^{-8}$	$1,08 \cdot 10^{-6}$	$5,19 \cdot 10^{-4}$	$4,16 \cdot 10^{-2}$	0,11	10,36	211,1

В твердом состоянии теплоемкость лития и энергия Гиббса описываются следующими выражениями [23]:

$$C_p = 1,309 + 56,287 \cdot 10^{-3} \cdot T + 0,602 \cdot 10^6 \cdot T^{-2}, \quad (1.4)$$

$$G = 3758 - 1,309 \cdot T \cdot \ln T - 0,301 \cdot 10^6 \cdot T^{-1} - 6,954 \cdot T - 28,144 \quad (1.5)$$

а в жидкой фазе вплоть до температуры порядка $2700\text{ }^{\circ}\text{C}$ теплоемкость лития и энергия Гиббса описываются следующими уравнениями:

$$C_p = 31,227 + 0,205 \cdot 10^6 \cdot T^{-2} - 5,265 \cdot 10^{-3} \cdot T + 2,628 \cdot 10^6 \cdot T^{-2}, \quad (1.6)$$

$$G = -1437 - 31,227 \cdot T \cdot \ln T - 0,102 \cdot 10^6 \cdot T^{-1} - 172,678 \cdot T + 2,633 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 0,438 \cdot 10^{-6} \cdot T^3, \quad (1.7)$$

где C_p – теплоемкость, Дж/(К · моль); T – температура, К; G – энергия Гиббса, кДж/моль.

Пары лития представляют собой смесь молекулярного и атомарного пара образование которой обусловлено эффектом димеризации, также как и для других щелочных металлов. Для двухатомной молекулы лития теплота ее диссоциации равна 6,4 кДж/моль.

Температурные зависимости теплоемкости насыщенного пара лития C_p , равновесной доли двухатомных молекул в нем X_2 , теплоты испарения H_E , а также плотности ρ_v приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Термодинамические свойства насыщенного пара лития

Т, К	X_2	ρ_v , кг/м ³	H_E , 10 ⁻³ кДж/кг	C_p , кДж/(кг · К)
900	0,004	$0,128 \cdot 10^{-4}$	21,76	3,94
1000	0,008	$0,872 \cdot 10^{-4}$	21,59	4,43
1100	0,014	$0,413 \cdot 10^{-3}$	21,39	4,95
1200	0,021	$0,150 \cdot 10^{-2}$	21,17	5,45
1300	0,030	$0,444 \cdot 10^{-2}$	20,93	5,91

Важным параметром для применения лития в ТЯР является теплота испарения и если сравнивать с другими легкоплавкими металлами, то литий имеет самое высокое значение теплоты испарения.

Также наиважнейшим свойством лития является его способность смачивать контактирующие с ним металлические материалы, что позволяет литию беспрепятственно проникать в поры и трещины. Величина поверхностного натяжения для жидкого лития при температурах 200 °С – 1300 °С определяется следующим обобщенным уравнением:

$$p = 438.98 - 18.44 \cdot 10^{-3} \cdot T - 132.20 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 37.44 \cdot 10^{-9} \cdot T^2, \quad (1.8)$$

где T – температура, К.

Параметр поверхностного натяжения для жидкого лития в сравнении с рядом других металлов имеет максимальное значение (для лития

поверхностное натяжение в точке плавления составляет – 406 мН/м , натрия – 200 мН/м, калия – 112 мН/м, рубидия – 87 мН/м и цезия – 71 мН/м). Данное свойство в совокупности с малой плотностью лития обуславливают капиллярные свойства лития.

Переносные свойства паровой и конденсированной фазы жидкого лития являются важными свойствами с точки зрения реализации прикладных задач по использованию жидко – литиевых систем и прокачки лития в этих системах.

Удельное электросопротивление лития в твердой фазе определяется уравнением:

$$\rho = 8.55 + 38.1 \cdot 10^{-3} \cdot t, \quad (1.9)$$

где ρ – удельное электросопротивление твердого лития, мкОм · см; t – температура, °С.

Обобщенная температурная зависимость электропроводности лития в жидком состоянии описывается следующим выражением:

$$k = 0.9249 \cdot 10^9 \cdot T^{-1} + 2.3167 \cdot 10^6 - 0.7131 \cdot 10^3 \cdot T, \quad (1.10)$$

где T – температура, К.

Проведенные при 300 °С исследования по определению влияния на электросопротивление лития чистоты металла, показали, что примеси кислорода, азота, водорода и углерода повышают электросопротивление лития (см. рис. 1.1).

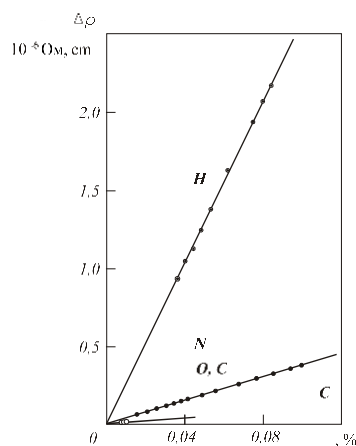


Рисунок 1.1. Зависимость удельного электросопротивления лития от концентрации в металле примесей при температуре 300 °С

Самое большое влияние на электросопротивление оказывает примесь азота. Введение азота в литий (в атомных долях порядка 0,1 %) приводит к увеличению электросопротивления лития на $0,7 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$. По данным, полученным в интервале температур от $280 \text{ }^\circ\text{C}$ до $350 \text{ }^\circ\text{C}$, при введении примеси азота и водорода в диапазоне концентраций C до 0,1 % электросопротивление лития растет пропорционально концентрации примеси:

$$\Delta\rho_N = 3,6 \cdot C_N \text{ и } \Delta\rho_H = 25 \cdot C_H. \quad (1.11)$$

Для определения теплопроводности лития в жидкой фазе используется следующее уравнение:

$$\lambda = 24,8 + 45,0 \cdot 10^{-3} \cdot T - 11,6 \cdot 10^{-6} \cdot T^2, \quad (1.12)$$

где λ – теплопроводность жидкого Li, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; T – температура лития, К.

При фазовом переходе солидус–ликвидус в точке плавления лития теплопроводность существенно снижается с $71,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ до $42,8 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

При температуре выше точки плавления лития динамическая вязкость описывается следующим выражением:

$$\ln \eta = -4,16435 - 0,63740 \cdot \ln T + 292,1/T \quad (1.13)$$

где T – температура, К.

Зависимости теплопроводности λ_v и динамической вязкости η_v от температуры паров приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3. – Значения теплопроводности и динамической вязкости паров лития при различных температурах

Свойство	Температура, К				
	800	900	1000	1100	1200
$\lambda_v, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	0,0546	0,0636	0,0725	0,0813	0,09
$\eta_v \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$	9,8	10,6	11,2	11,7	12

Одной из важных характеристик, существенно влияющих на применение лития в ТЯЭУ, являются его эмиссионные свойства, которые определяют возможность эффективного снятия тепловых нагрузок с

элементов конструкции ТЯЭУ посредством равномерного распределения их по установке за счет переизлучения. Работа выхода для жидкого лития составляет порядка 2,38 эВ.

Под воздействием электромагнитного излучения может происходить эмиссия электронов. Значение относительного сечения фотоионизации лития составляет 0,009 (сечение фотоионизации на линии 1s для натрия принято за единицу). Основной фотоэлектронной рентгеновской линией для лития является 1s переход средняя энергия которого составляет 56 эВ. При бомбардировке литиевой поверхности электронами с энергией 75 эВ коэффициент вторичной электронной эмиссии равна 0,48. Наличие узких линий в спектрах вторичных электронов свидетельствует о наличии Оже-электронов, выходящих из лития без рассеивания. Энергия пика Оже-электронов лития составляет 43,0 эВ. Также электроны эмитируются и при облучении лития ионами различных газов.

При использовании лития в качестве приемной поверхности внутрикамерных элементов ТЯЭУ, подвергающихся высоким тепловым нагрузкам (дивертор, лимитер), стоит обратить внимание на такие процессы как испарение и конденсация лития. Испарение и конденсация представляют собой процессы переноса массы и тепла. Перенос массы металла характеризуют коэффициентом масс отдачи β , перенос тепла коэффициентом теплоотдачи α . Для описания процесса фазового перехода в целом используют вышеприведенные параметры. Также используется величина термического сопротивления, которая равна $R = 1/\alpha$ и обратна коэффициенту теплоотдачи. При испарении и конденсации лития в условиях отсутствия загрязнений паровой фазы параметры термического сопротивления рассчитываются путем сложения сопротивления фазового перехода и сопротивления в конденсированной фазе.

Испарение жидкого лития с поверхности и конденсация пара на металлической поверхности являются динамическими и поэтому рассматриваются с кинетических позиций. Поток, испаряющихся с

поверхности атомов лития при термодинамическом равновесии фаз i_v , равен потоку атомов, конденсирующихся на поверхности металла i_k . Однако не все соударяющиеся с поверхностью атомы лития, ей удерживаются. Часть атомов i_{mir} отражается обратно в пар. Для этой части атомов введено понятие как коэффициент конденсации f (при испарении – коэффициент испарения). При различных условиях эти коэффициенты имеют различные значения, однако в случаях, при использовании лития в разрядной камере токамака, эти коэффициенты равнозначны. Обнаружение видимых результатов процессов испарения и конденсации лития на внутрикамерных элементах объясняется как следствие отклонения от равновесных условий, при нарушении равенства потоков испарения и конденсации (см. рис.1.2). В таких случаях значения температуры поверхности жидкого лития не совпадает со значениями температуры насыщения литиевого пара. В таких случаях на границе фазового перехода фиксируется скачок температуры. Также в этом случае фиксируется скачок давления, который определяется балансом действующих сил. Для количественного описания испарения лития, используются газокинетические представления, представленные нижеприведенными зависимостями.

Когда процесс испарения и конденсации протекает с небольшим отклонением от равновесия, то скорость испарения G будет определяется следующим выражением:

$$G = \frac{f}{1 - 0,4f} \cdot \frac{P_0 - P}{g \sqrt{(2\pi RT_0 M^{-1})}}. \quad (1.14)$$

Выражение (1.14) применимо при $(P_0 - P)/P \leq 0,1$.

При большом отклонении от равновесия процесса испарения, для оценки величины G приводится следующая приближенная формула:

$$G = \frac{8P}{g \sqrt{(2\pi RT M^{-1})}} \cdot \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{2} - \sqrt{\frac{1}{f^2} - \frac{1}{f} + \frac{P_0}{4P} \sqrt{\frac{T}{T_0}}} \right), \quad (1.15)$$

где T и T_0 – температура поверхности металла и температура литиевого пара, K ; M – молекулярная масса; P и P_0 – давление насыщенного пара; g – ускорение

свободного падения; f – коэффициент испарения; R – универсальная газовая постоянная.

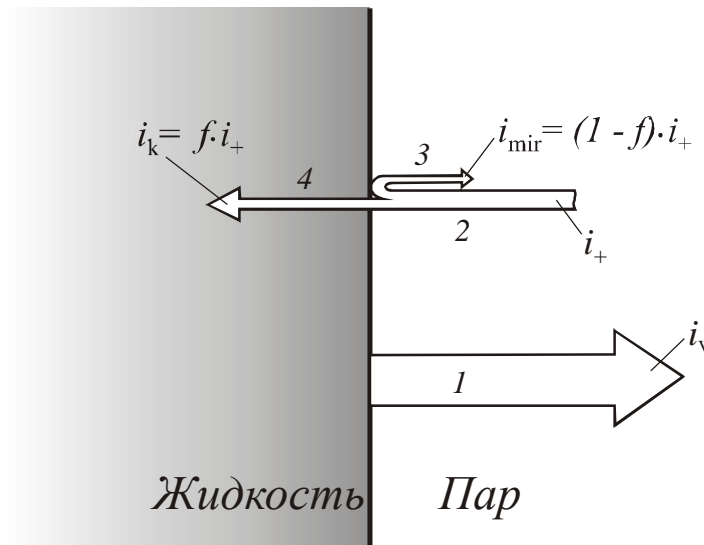


Рисунок 1.2. Схема процесса испарения лития

При фазовых переходах, например, при испарении лития в вакууме, скорость этого испарения определяется температурой жидкометаллической поверхности и не зависит от температуры пара. При испарении жидкого металла в вакуум с открытой поверхности скорость процесса определяется с помощью следующего выражения:

$$G_{\max} = f \cdot \frac{P_0}{g \sqrt{(2\pi RT_0 M^{-1})}} \cdot \quad (1.16)$$

Коэффициент f сильно зависит от присутствия загрязняющих веществ на поверхности жидкости. Изменение коэффициента обусловлено изменением механизма испарения, то есть при высоких температурах из-за повышения давления литиевого пара над поверхностью происходит смена механизма испарения от молекулярного к вязкостному и это не связано с модификацией качества поверхности.

Пары жидкого лития очень хорошо отводят энергию с поверхности металла. Значения максимального теплового потока Q рассчитываются с использованием следующей формулы:

$$Q = r \cdot G_{\max}, \quad (1.17)$$

где r – теплота парообразования.

На рисунке 1.3 представлены значения удельного теплового потока отводящегося со свободной поверхности различных металлов при испарении в зависимости от температуры.

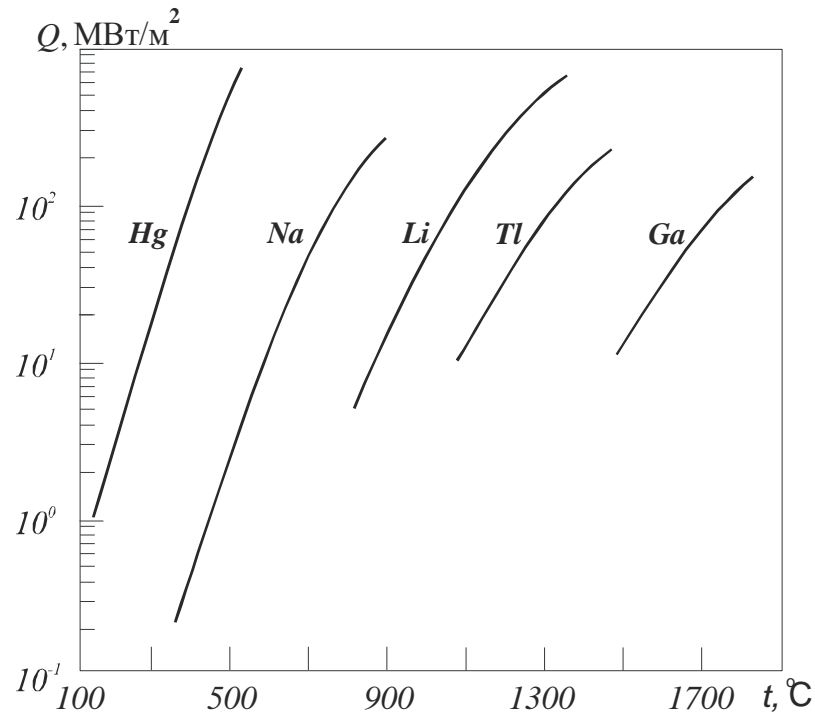


Рисунок 1.3. Значения удельного теплового потока, отводимого от поверхности жидких металлов при испарении, в зависимости от температуры [33]

Механизм конденсации паров жидкого металла из которого конденсируется пар напрямую зависит от условий смачивания. Уровень смачивания жидкостью определяется углом кромки смачивания. Если граничный угол смачивания $\nu > 90^\circ$, то смачиваемости твердой поверхности жидким металлом не происходит. В случае, когда граничный угол смачиваемости $\nu < 90^\circ$, то происходит смачивание твердой поверхности. Величина граничного угла ν обусловлена силой взаимодействия молекул на границах фаз и характеризуется коэффициентом поверхностного натяжения в динамическом равновесии фаз при отсутствии внешних сил. В общих случаях возможно только определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости из-за этого определение краевого угла смачиваемости определялось экспериментальным путем. Существует два вида смачивания, физическое и химическое. Физическое смачивание характеризуется силой молекулярного взаимодействия, а химическое смачивание характеризуется действием ионных

сил. При физическом смачивании межфазная сила во много раз меньше, чем в случае химического смачивания. В случае конденсации на твердых чистых металлических поверхностях жидких металлов происходит химическое смачивание с образованием небольших краевых углов. Присутствие оксидов и других примесей на металлической поверхности, приводит к смене вида смачивания и приводит к тому, что некоторые жидкие металлы не смачивают поверхность. В связи с тем, что литий имеет высокое химическое сродство к кислороду и другим неметаллам, то смачивание его паром поверхностей при наличии на них неметаллических примесей происходит даже более эффективно, чем для чистых металлических поверхностей. Смачивание – это процесс, который ограничен кинетикой межфазных взаимодействий, и чем ниже температура, тем медленнее он протекает. Свойства и кинетика смачивания твердых металлических поверхностей жидким литием приводятся на рисунке 1.4. Литий смачивает конструкционный материал, как и другие щелочные металлы, а характер конденсации имеет пленочный вид.

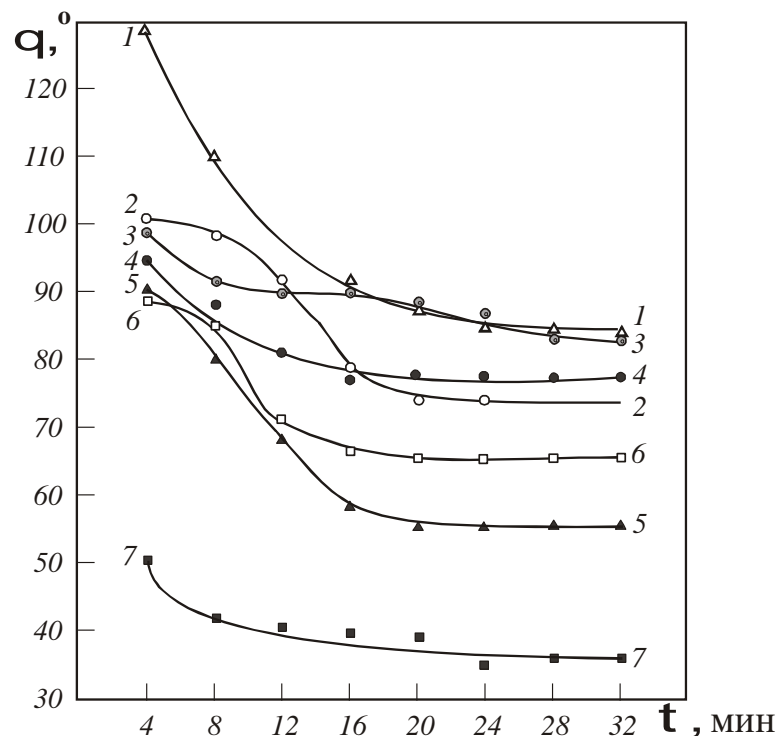


Рисунок 1.4. Зависимость граничного угла смачивания литием различных материалов при температуре лития 300 °С от времени: 1 – хромистая ферритная нержавеющая сталь; 2 – окисленная поверхность хромистой ферритной нержавеющей стали; 3 – Cr–Ni аустенитная нержавеющая сталь; 4 – окисленная поверхность Cr–Ni аустенитной нержавеющей стали; 5 – чистый Ni; 6 – чистое железо; 7 – поверхность окисленного чистого железа

Как можно видеть на практике, после некоторого времени работы в литиевой системе наблюдается, что твердый металл полностью смачивается жидкостью ($\nu \rightarrow 0$). Однако в процессе конденсации лития возникало граничное сопротивление слоя пара на поверхности конденсации, это значит, что на границе пар–конденсация имеется сопротивление фазовому переходу. Главным образом сопротивление определяется присутствием в парах неконденсирующихся газов (например, гелия) и других веществ. Хотя наличие димеризованных молекул в литиевом паре практически не влияет на интенсивность конденсации. Также очевидно, что на коэффициент конденсации сильно влияет чистота поверхности твердого металла, а следовательно, и на скорость конденсации. Это характерно для области низких температур, когда в результате взаимодействия жидкого лития с остаточными газами образуется пленка оксидов и нитридов которые практически не уходят с поверхности и не растворяется в объем металла.

Экспериментальные работы по исследованию процессов конденсации как для лития, так и для других щелочных металлов сложны в реализации и поэтому имеющиеся результаты могут быть весьма противоречивыми. В работе [33] приводится описание исследований проведенных по специально разработанной методике процессов конденсации в интервале температур от 730 °С до 850 °С. Полученные результаты приведены на рисунке 1.5.

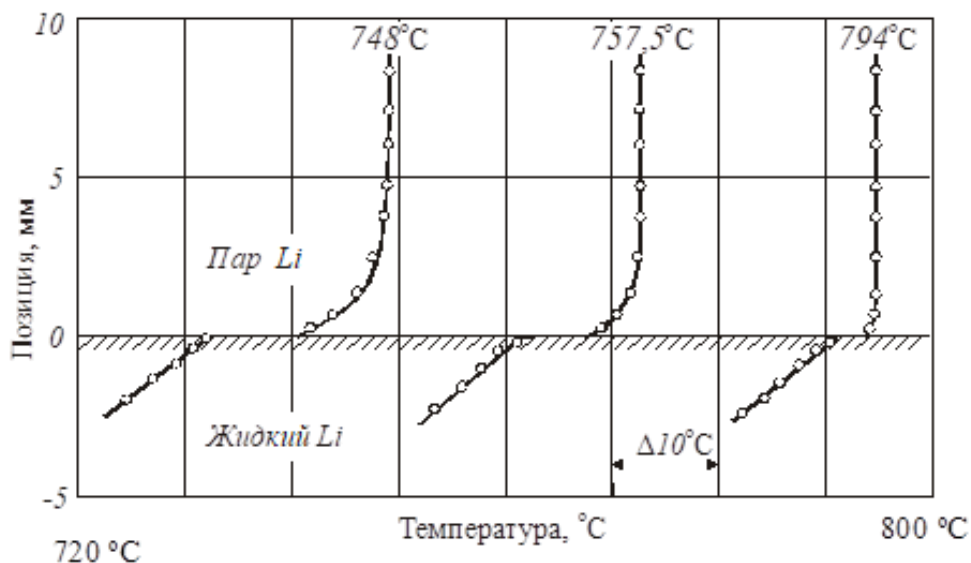


Рисунок 1.5. Температурные поля конденсации пара лития

На приведенном выше рисунке видно, что в паре лития отсутствует диффузионное сопротивление, случае же пленочной конденсации чистых паров лития термическое сопротивление определяется путем сложения значений сопротивления фазового перехода и сопротивления пленки конденсата.

Важным фактором при обслуживании литиевых систем ТЯР является характер и степень активации лития в жидкой фазе. В жидкометаллических литиевых системах ТЯР в процессе эксплуатации будет происходить наработка β радиоактивного изотопа водорода – трития, период полураспада которого составляет $3,9 \cdot 10^8$ с. Сечения реакций взаимодействия ядер ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$ с нейтронами в зависимости от их энергии приведены на рисунке 1.6.

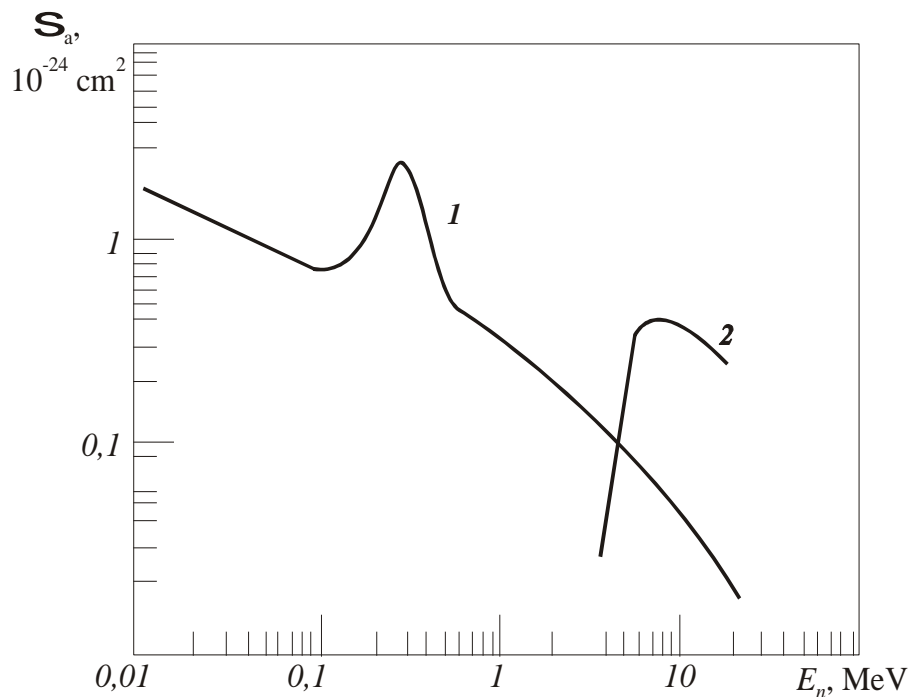


Рисунок 1.6. Зависимость сечения ядерных реакций от энергии нейтронов [34]:

$$1 - {}^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}; 2 - {}^7\text{Li}(n, n'\alpha)\text{T}$$

Наведенная при облучении нейтронами лития активность практически отсутствует, так как образующиеся радионуклиды ${}^8\text{Li}$, ${}^9\text{Li}$ и ${}^{11}\text{Li}$ обладают малым периодом полураспада (соответственно 0,8420; 0,1760 и 0,0085 с). Таким образом, степень активации лития при работе термоядерного реактора в большей степени будет зависеть от наличия примесей в металле. Примеси могут присутствовать как в исходном литии, так и поступать из плазмы. Так

же поступление примесей в металл может быть вызвано образованием продуктов взаимодействия жидкого лития с конструкционными и функциональными материалами.

Важным фактором применения лития в термоядерных энергетических установках нового поколения является взаимодействие лития с водородом и его изотопами. Взаимодействие лития и водорода начинается при комнатной температуре с выделением тепла и протекает с умеренной скоростью, взаимодействие идет до тех пор, пока не произойдет насыщение лития водородом до равновесных концентраций, процесс протекает спокойно без взрывов. За 24 часа при комнатной температуре литий поглощает до 8 % масс водорода, а за месяц порядка 36 % масс. Заметное снижение скорости поглощения связано с образованием плотной пленки гидрида лития, через которую диффузия водорода сильно затруднена. При взаимодействии водорода с литием образуется бинарное соединение, гидрид лития LiH. Гидрид лития визуально представляет собой бесцветное или белое кристаллическое вещество. В зависимости от наличия примесей цвет кристаллов гидрида может меняться. Отмечается, что в случае хранения гидрида в условиях дневного света под действием ультрафиолета кристаллы приобретают голубую окраску что объясняется частичным разложением гидрида сопровождающегося процессами выделения водорода и образования тонкодисперсного лития. Температура плавления гидрида лития составляет 692 ± 2 °С. Его кристаллы имеют кубическую гранецентрированную решетку, параметр решетки изменяется от 0,406 нм при комнатной температуре до 0,42 нм в точке плавления. Плотность гидрида лития изменяется от 0,7753 при 293 К до 0,7593 г/см при плавлении. В жидкой фазе плотность гидрида лития изменяется в соответствии с формулой $d = 0,787 - 0,209 \cdot 10^{-3} T$, где плотность в г/см³, температура T в К.

Сравнительно немногочисленные литературные данные по растворимости водорода в литии приведены на рисунке 1.7.

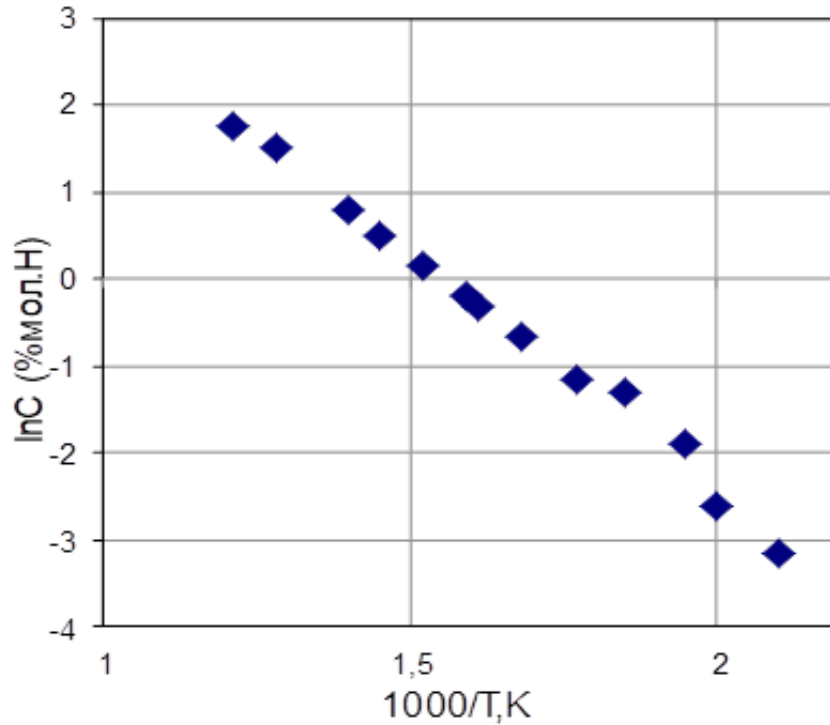


Рисунок 1.7. Зависимость растворимости водорода в литии от температуры

Поэтому вполне оправдано использовать для определения растворимости водорода в литии рекомендованную в работе [35] зависимость:

$$\ln C (\% \text{ масс}) = 6,15 - 5803/T(\text{K}). \quad (1.18)$$

Ненасыщенный раствор водорода в литии подчиняется зависимости Сивертса, согласно которому концентрация водорода в литии пропорциональна квадратному корню из парциального давления водорода над раствором

$$N_H (10 - 4 \% \text{ масс}) = k_s / \sqrt{P_{H_2} (\text{Па})}. \quad (1.19)$$

Значения параметров константы Сивертса $k_s = A - B/T$ для растворов водорода, дейтерия и трития в литии даны в таблице 1.4, размерность — $10^{-4} \% \text{ масс} \cdot (\text{Па})^{-1/2}$ [36].

Таблица 1.4 – Параметры константы Сивертса для растворов изотопов водорода в литии

Изотоп	A	B	Интервал температуры, К
Водород	-0,563	-6384	1000 — 1200
Дейтерий	-0,358	-5964	1000 — 1200
Тритий	-0,242	-5794	1000 — 1200

Погрешность данных по давлению изотопов водорода над растворами в литии неодинакова. Так авторами книги [37] погрешность для системы водород и дейтерий –литий слева от зоны не смесимости оценивается в 2 %, справа — в 5 %. Поскольку прямые эксперименты для системы литий –третий отсутствовали, авторы [37] использовали соотношения, полученные из условий подобия. Погрешность данных для системы тритий –литий ими оценивается в 5 %.

1.2 Концепция применения лития в ТЯР

В качестве одного из материалов, способных решить многие задачи создания энергетического термоядерного реактора с высокой эксплуатационной эффективностью и ресурсоемкостью, рассматривается жидкий литий, осуществляющий необходимые характеристики теплоносителя, материала, производящего тритий, основной плазмы, и функции материала, способного обеспечить защитные материалы приемных диверторных устройств и первой стенки. Применение лития в качестве теплоносителя, материала, выделяющего тритий, материала первой стенки и материала, контактирующего с плазмой, рассматривалось как наиболее эффективный способ решения материаловедческих задач создания термоядерного реактора [38 – 43].

Концепция реактора, в котором жидкий литий совмещает в комплексе все перечисленные функции, была предложена на одной из конференции по термоядерной энергии организованной МАГАТЭ [44].

Возможность использования жидких металлов в качестве материалов, контактирующих с плазмой в термоядерных установках, рассматривалась давно. Его привлекательность заключалась в простоте рассеивания тепла за счет быстро протекающего потока жидкого металла из энергоемких приемных элементов токамака, самовосстановления поверхности жидкого металла, в основном за счет способности токамака создавать капельные завесы,

нечувствительные к воздействию переменных магнитных полей [45 – 61]. В качестве защитного материала для ТЯР рассматривался жидкий литий и как следствие проводились исследования с данным материалом на различных действующих плазмо – физических установках и токамаках.

1.2.1 Эксперименты с литием на плазмо-физических установках

На линейном ускорителе СПРУТ–4, который расположен в НЦ «Курчатовский Институт» (Москва, Россия), одними из первых, были проведены исследования по возможности применения лития в ТЯР.

Плазменная установка с прямым магнитным полем $B = 0,3$ Т, режим работы – стационарный, длина вакуумной камеры 3 м, разрядная зона – длина 1 м, диаметр 16 см, способ создания плазмы – пучково –плазменный разряд в скрещенных $E \times B$ полях, давление рабочего вещества от $1,10^{-5}$ до 10^{-1} торр, электронный инжектор 20 кВ \times 5 А, источник радиального поля 150 В \times 100 А, рабочее вещество – газы, пары металлов, плотность плазмы от 10^{11} до 10^{14} см $^{-3}$, температура электронов от 1 до 30 эВ. Установка предназначена для экспериментального исследования плазменно-пучкового разряда в парах металлов в перекрестных электрических и магнитных полях. На установке были реализованы исследования по применению лития в сочетании с капиллярно–пористыми системами предложенных для применения в термоядерном реакторе в качестве материала, контактирующего с плазмой.

На плазменной установке СПРУТ –4 был проведен ряд экспериментов по испытанию с литием при воздействии на него высоких квазистационарных тепловых нагрузок. Целью проведенных экспериментов было исследование интенсивности испарения лития из облучаемой мишени, определение энергетического баланса процесса и температуры поверхности в зависимости от мощности удельного теплового потока (интервал составлял от 1 МВт/м 2 до 25 МВт/м 2).

При облучении электронным пучком большой удельной мощности на установке СПРУТ-4 получены самые высокие скорости эмиссии лития, превышающие при соответствующих температурах на порядок и более эмиссию при плазменном воздействии на литиевую поверхность [62 – 64], таким образом, поток высокоэнергичных электронов наиболее сильно изменял свойства поверхности жидкого лития. Скорее всего, подобные эффекты будут проявляться также и для любых других жидкометаллических поверхностей. Модели ионного распыления и вакуумного испарения не смогли удовлетворительно объяснить полученные результаты. Как отмечено в работе [62], исследователи столкнулись, с проявлением фундаментального свойства процессов взаимодействия плазмы с жидкими поверхностями, оно заключается в ускорении эмиссии. Эксперименты показали, что процесс аномального излучения имеет внешнее сходство с испарением. Было предположено, что в данном случае происходило так называемое «радиационно – ускоренное» испарение.

В экспериментах моделировались процессы, которые скорей всего будут протекать в литиевом диверторе при эксплуатации ТЯР, была оценена роль этих процессов для выбранных условий проведения эксперимента:

- при температуре от 350 °С до 970 °С с поверхности лития была зафиксирована скорость испарения металла над поверхностью мишени, масса лития, выходящего с поверхности, компенсировалась добавлением лития за счет капиллярных сил при достижении доли мощности, выделяемой литиевым паром от мишени до 0,7;

- было обнаружено, что часть энергии, передаваемой электронным излучением, расходуется на ионизацию пара лития, которая сопровождалась возбуждением интенсивного свечения нейтрального и ионизированного лития в области длиной до 10 см вблизи целевой поверхности;

- зафиксировано, что оставшаяся часть энергии, поступающей в мишень распределена теплоносителем системой теплоотдачи;

– выявлено что в ходе экспериментов происходили процессы диффузии и рекомбинация литиевой плазмы, а также конденсация литиевого пара в транспортном канале установки в продольном магнитном поле, эффективность этих процессов была настолько велика, что обеспечивалась без пробойная устойчивая работа электронной пушки на всех режимах установки.

Эксперименты, описанные в работах [65, 66] показали, что мишени с жидким литием стабилизированным в КПС способны выдерживать длительные тепловые нагрузки при удельных потоках до 25 МВт/м^2 , в случае кратковременного воздействия на мишень зафиксирована возможность лития выдерживать тепловые нагрузки до 50 МВт/м^2 . Исследование проводимое спектроскопическим методом в области свечения показало наличие излучения нейтрального и ионизованного лития при полном отсутствии линий характерных для материала металлической матрицы КПС.

Так же исследования с литием проводились на плазменных ускорителях КСПУ, МК –200UG и установке «Плазменный фокус» которые размещены в ТРИНИТИ, г. Троицк, Московская область. Данные установки предназначены для изучения процессов взаимодействия высокоэнергичных и высокотемпературных потоков плазмы с жидкометаллическими, твердотельными и газовыми мишенями.

На установках проводились плазменные эксперименты по испытанию литиевых КПС в условиях, моделирующих вихревые возмущения токов, возникающих на периферии плазмы (ELM) и моделирующих срывы плазмы. Влияние такого рода воздействий на литиевую КПС было смоделировано с помощью потока дейтериевой плазмы в плазменных ускорителях КСПУ, МК –200UG и на установке «Плазменный фокус» [67, 68]. Цель этих работ заключалась в исследовании взаимодействия плазмы с мишенями, в которых литий находился в твердой и жидкой фазах, и взаимодействие плазмы с мишенями, изготовленными из традиционных твердых металлов (W, Mo, V, сталь X18H10) и КПС (без лития).

В реализованных плазменных экспериментах [69] были смоделированы энергетические нагрузки на поверхность КПС, возникающие на диверторных пластинах в режимах срыва тока плазмы.

Облучение мишени осуществлялось ионизированным потоком водорода, двигавшегося в продольном магнитном поле в импульсном режиме на ускорителе КСПУ. Характерной особенностью процесса взаимодействия потока плазмы с поверхностью жидкого лития было образование плотного слоя плазмы и нейтральных атомов лития вблизи поверхности мишени.

Эксперименты были продолжены на плазменном ускорителе МК – 200UG и установке «Плазменный фокус». В результате проведенных экспериментов было выявлено, что никаких разрушений и деградации поверхности КПС, заполненной литием, после воздействия многочисленных плазменных импульсов обнаружено не было. Что не скажешь об экспериментах с твердыми металлами. В этих работах было зафиксировано что после плазменного импульса появился ярко выраженный рельеф на оплавленной поверхности образцов ванадия, молибдена, и нержавеющей стали, а также зафиксировано их растрескивание. В случае с образцом КПС без лития, то она была полностью разрушена после одного плазменного импульса. В проведенных работах была отмечена следующая характерная особенность поведения КПС, представляющая интерес. В экспериментах с жидким литием скорость эрозии лития с поверхности КПС не возрастала от импульса к импульсу, а также не наблюдалось образования поверхностного рельефа оплавления как это происходило для твердых материалов.

Так же эксперименты показали, что, капиллярные силы могут обеспечить подавление эрозии, а образование излучающего защитного слоя может служить объяснением высокой устойчивости литиевых КПС к воздействию импульсных тепловых нагрузок высокой удельной мощности.

1.2.2 Эксперименты с литием на токамаках

Впервые работы по исследованию влияния лития на параметры плазмы во время разряда были проведены в Принстонской лаборатории физики плазмы (PPPL, USA) на токамаке Tokamak Fusion Test Reactor. Основная идея экспериментов заключалась в том, что инжектированный в плазму литий, испаряясь, будет создавать однородно покрывающий стенку защитный слой. В экспериментах по литиизации камеры TFTR использовался метод пеллет – инъекции, то есть во время разряда в камеру токамака через инжектор вводился литий в виде пеллетов (капсул).

Была проведена серия экспериментов по литиизации камеры токамака TFTR. Результаты экспериментов показали, что исследование материалов с малым зарядом ядра является наилучшим решением для создания защитного слоя первой стенки и существенного повышения чистоты плазмы. Даже монослой лития на поверхности существенно снизил содержание примесей в плазме и эффективный заряд плазмы (более чем на 40 %). [70, 71].

После проведенных на TFTR исследований в Принстонской лаборатории физики плазмы, на сферическом токамаке Current Drive Experiment–Upgrade (CDX–U) были продолжены работы по исследованию взаимодействия лития с обращенными к плазме материалами и влияние его на параметры плазмы.

Основной целью проведенной серии экспериментов было с помощью литиевого лимитера проверить возможность управления рециклингом рабочего газа, а в последующем в моменты удержания плазмы провести литиизацию камеры токамака с целью покрыть первую стенку литием.

Для проведения работ с литием на CDX–U в нижней части токамака, на дне камеры, был установлен тороидальный лимитер, заполненный жидким литием с общей площадью поверхности 2000 см².

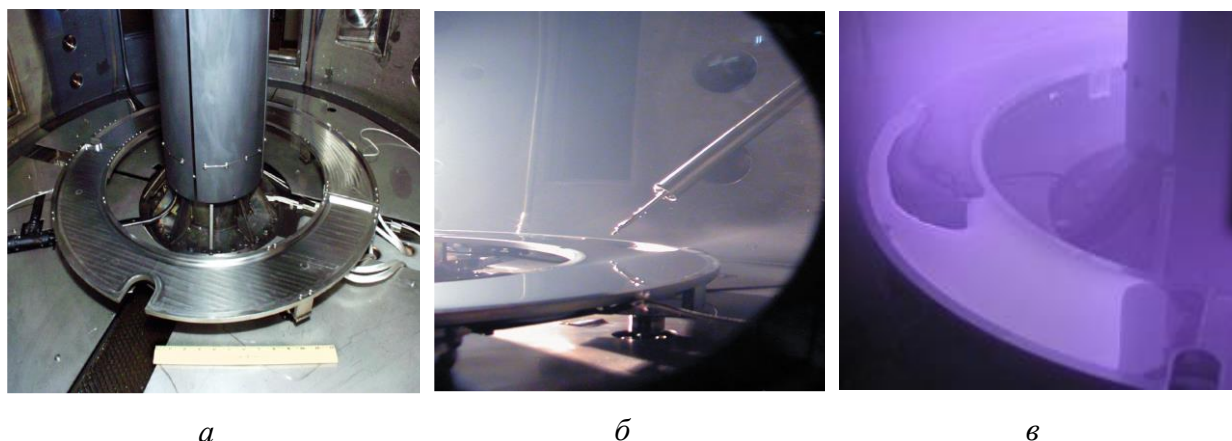


Рисунок 1.8. Фотографии тороидального лимитера CDX-U: *а* – расположение лимитера в камере, *б* – система заливки лития, *в* – очистка лития в тлеющем разряде аргона

Проведенная серия экспериментов на CDX – U показала, что при подготовке установки к разряду, перед напуском топлива, литий, находящийся в тороидальном лимитере благодаря своим хорошим геттерирующим свойствам, значительно снижает количество примесей в вакуумной камере, а наибольшее снижение примесей в вакуумном объеме токамака приходилось на такие элементы как кислород, углерод и вода. Так же при использовании лития в качестве лимитера во время разрядов было зафиксировано значительное снижение, до 30 %, рециклинга рабочего газа. Проведенная литиизация камеры существенно улучшила параметры плазмы ($Z_{эф} \leq 1,2$), а образовавшаяся на периферии плазменного шнура литиевая плазма снижала вероятность возникновения ELM. Исследовано МГД воздействие между литием и плазмой, как в стационарном режиме, так и во время пробоя.

Параллельно с экспериментами на CDX-U на установке National Spherical Torus Experiment (NSTX) были поведены эксперименты по исследованию возможности применения лития в ТЯР.

Токамак NSTX так же находится в Принстонской лаборатории физики плазмы и представляет собой большой сферический токамак со следующими параметрами: $R = 0,85$ м; $a = 0,67$ м; ток плазмы – $I_p \leq 1,5$ МА; $B_t \leq 0,55$ Т, длительность импульса от 1 до 5 с; $n_e(0) \leq 1,21 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$; T_e от 1 до 5 кэВ. Мощность дополнительного нагрева: RF (30MHz) – 6МВт, NBI (100kV) – 7МВт.

Результаты, полученные на токамаке NSTX, хорошо согласовались с результатами проведенных ранее экспериментов на установке CDX-U.

Проводя обзор состояния работ по применению литиевых технологий на плазменных установках, не справедливо было бы не отметить стеллараторы. Одним из таких является TJ-II. Стелларатор TJ-II находится в Мадриде (Испания) и принадлежит Центру Энергетических, Экологических и Технологических Исследований (CIEMAT). Параметры установки следующие: $R = 1,5$ м; $a = 0,22$ м; ток плазмы – $I_p \leq 100$ кА; $Vt \leq 1$ Т; длительность импульса 0,3 с; $n_e(0) = (0,3...6,0) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$; T_e от 0,1 до 2 кэВ. Мощность дополнительного нагрева: RF – 600кВт, NBI – 1000кВт.

На данной установке были проведены работы по исследованию влияния лития на параметры плазмы в процессе разряда. Для литиизации TJ-II был использован метод вакуумного напыления, то есть перед разрядом при температуре первой стенки 20 °С с помощью электронного луча внутри камеры испаряли литий (так, например, для проведения 1000 разрядов было испарено всего общей сложностью 12 г лития).

Проведенные эксперименты показали, что даже незначительное покрытие литием обращенных к плазме материалов существенно улучшали параметры плазмы. Это выразилось в снижении рециклинга рабочего газа, в уменьшении поступления примесей со стенок камеры в плазму и соответственно снижении $Z_{эф}$, рекордного для стеллараторов увеличения плотности плазмы в центре шнура $n_e(0) = 8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и увеличение времени импульса.

В РФ эксперименты по исследованию возможности применения лития в ТЯР проводились на токамаке Т-11М который находится в АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ».

Токамак Т-11М – один из реально действующих в настоящее время Российских токамаков предназначенный для проведения экспериментов в поддержку Программ Российской Федерации по УТС и проекта ИТЭР.

Ближайшими аналогами могут служить крупнейшие в мире действующие токамаки: Объединенный Европейский токамак JET (Англия) и токамак JT – 60U (Япония).

Параметры установки: ток в плазме 0,1 МА, температура плазмы от 400 до 600 эВ, плотность плазмы – $7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. На установке ведутся исследования ионно-циклотронного нагрева плазмы, изучение динамики срыва разряда, отработка новых диагностик плазмы, исследование материалов первой стенки.

Работы по исследованию устойчивости литиевых КПС в условиях воздействия высокотемпературной плазмы токамака были начаты на Т – 11М еще в 1998 г. [72]. Экспериментальные исследования литиевой программы состояли из двух этапов. Целью первого этапа экспериментов было проверить стабилизацию жидкого лития в КПС, которая является приемной поверхностью лимитера в случае токамака. Изучен уровень неконтролируемого потока лития с поверхности жидкого металла в камеру в результате аномальных механизмов эрозии лития.

В процессе осуществления экспериментов в процессе разряда проводились измерения температуры поверхности литиевой диафрагмы ИК-радиометром и определялась удельная тепловая нагрузка на поверхность диафрагмы. Проведены калориметрические измерения расхода энергии на диафрагму при различных режимах работы установки. Были определены абсолютные значения потоков лития от поверхности диафрагмы к плазме и проведена оценка эрозии лития. По полученным данным были сделаны следующие выводы:

- материал на основе литиевой КПС не разрушается и не теряет своих свойств при длительных испытаниях на установке при температурах до 400 °С и нагрузках до $\sim 10 \text{ МВт/м}^2$;

- в процессе плазменного разряда температура поверхности повышается примерно на величину от 100 до 300 °С в зависимости от величины радиационных потерь. При нагреве лития относительное энерговыделение на диафрагме снижается от 30 до 15 %;

– эрозия поверхности лития в условиях T –11M при температуре поверхности $T_s < 500$ °C обусловлена главным образом ионным распылением, при $T_s > 500$ °C основной механизм – тепловая эмиссия. Абсолютная величина удельного потока атомов лития с поверхности в плазму имеет масштаб порядка $1 \cdot 10^{19} \text{сек}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ при температуре $T_s < 500$ °C;

– коэффициент ионного D^+ распыления для жидкого лития составляет величину 0,7 и хорошо согласуется с экспериментальными данными пучковых экспериментов;

– скорость напыления лития составляет примерно 1 монослой за 5 импульсов;

– напыление лития на стенки камеры токамака значительно уменьшает рециклинг рабочего газа и приводит к значительному снижению плотности;

– уменьшение рециклинга наблюдается не только на дейтерии, но и на гелии.

Также проведенные опыты показали, что в условиях T-11M капиллярные силы пористой структуры с жидким литием достаточны для обеспечения механической стабильности лития по отношению к процессам МГД, литиевая капиллярная система, основанная на молибденовых или стальных конструкциях, выдержала без повреждения более 2000 разрядов с выходной мощностью в лимите на уровне 10 МВт/м^2 и литий совместим с краевой плазмой токамака, т. е. аномальных процессов эрозии лития не обнаружено [73 – 75].

Далее, был проведен второй этап серии экспериментов по испытанию новой литиевой диафрагмы с тонким защитным слоем на основе капиллярно – пористой структуры. Основной целью данных экспериментов было получение и изучение квазистационарных режимов работы защитного литиевого покрытия в условиях удлиненного разряда. Исследования литиевой диафрагмы проводились в сравнении с поведением графитовой диафрагмы.

Помимо стандартных оптических диагностик (измерения интенсивностей спектральных линий LiI , LiII , интегрального света),

регистрирующих поступление лития в разряд, в районе Li –лимитера была установлена 15 –канальная болометрическая система и развита специальная инфракрасная диагностика поверхности лимитера, позволявшая определять его поверхностную температуру и, соответственно, мощность тепловыделения в ходе разряда [76].

В ходе проведения экспериментов измерялась температура поверхности диафрагмы во время разряда, определялось поведение излучения лития от поверхности плазмы по интенсивности свечения нейтральной литиевой линии с поверхности диафрагмы, измерялось радиальное распределение радиационных потерь, оценивалось значение электронной температуры на оси шнура $T_e(0)$, измерялась плотность в различных аккордах, определялось поведение температуры поверхности лимитера в процессе разряда и определен расчетный удельный тепловой поток. Для оценки содержания ионов лития в центре плазмы были проведены расчеты эффективного заряда Z_{ef} , который составляет около 1,1 для квазистационарного режима разряда. Такие низкие значения $Z_{эф}(0)/q(0)$ (до $q(0) \approx 1$) означают получение практически чистой дейтериевой плазмы в центре шнура.

Таким образом, из проведенных опытов видно, что в процессе разряда уровень излучения от центральной зоны снижается, что свидетельствует о связывании лития, попадающего в стенки разрядной камеры, с примесями, ответственными в других случаях за радиационное охлаждение плазмы. А литий, поступающий в плазму, концентрируется на ее периферии, и литизация стенок токамака за счет сорбционных свойств лития блокирует попадание примесей в плазму, ответственных за его рост $Z_{эф}$. Это подтверждает совместимость плазмы токамака с литием в случае экспериментов.

В тоже время на токамаке T – 11M проводились эксперименты по исследованию распределения лития и водорода в скрэп–слое литиевого лимитера, так как пока мало был изучен вопрос циркуляции и миграции лития в процессе работы токамака с горячих зон лимитера на его холодные области и стенку камеры токамака. Эксперименты проводились в водородной и

дейтериевой плазме, в омическом режиме ($I_p = 70\text{кА}$, $V_t = 1,2\text{Тл}$). Использовались два лимитера: литиевый, как основной, на фиксированном радиусе 17,5 см и вспомогательный графитовый, положение которого могло изменяться в диапазоне от 19 до 25 см. С помощью оптической диагностики одновременно измерялись интенсивности свечения линии нейтрального лития Li ($\lambda = 670,8\text{ нм}$) и линии Н-альфа с поверхности графитового дополнительного лимитера, установленного в «тени» литиевого лимитера. Дополнительно одновременно регистрировалась интенсивность свечения линии Li от литиевого лимитера. Таким образом, изменяя от разряда к разряду положение графитового лимитера, определялись распределение рециклинга потока лития и водорода в скрэп-слое по свечению линии LiI ($\lambda=670,8\text{ нм}$) и линии Н-альфа. Из экспериментальных значений λ определен поперечный коэффициент диффузии ионов лития в водородной плазме $D_{\perp} \approx 7 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{с}$, который оказался близок к Бомовскому значению $D_B = kT_e/16\text{еВ} \approx 10^4 \text{ см}^2/\text{с}$. На рисунке 1.9 представлены полученные значения коэффициентов поперечной диффузии для дейтерия, водорода и лития в водородной и дейтериевой плазме.

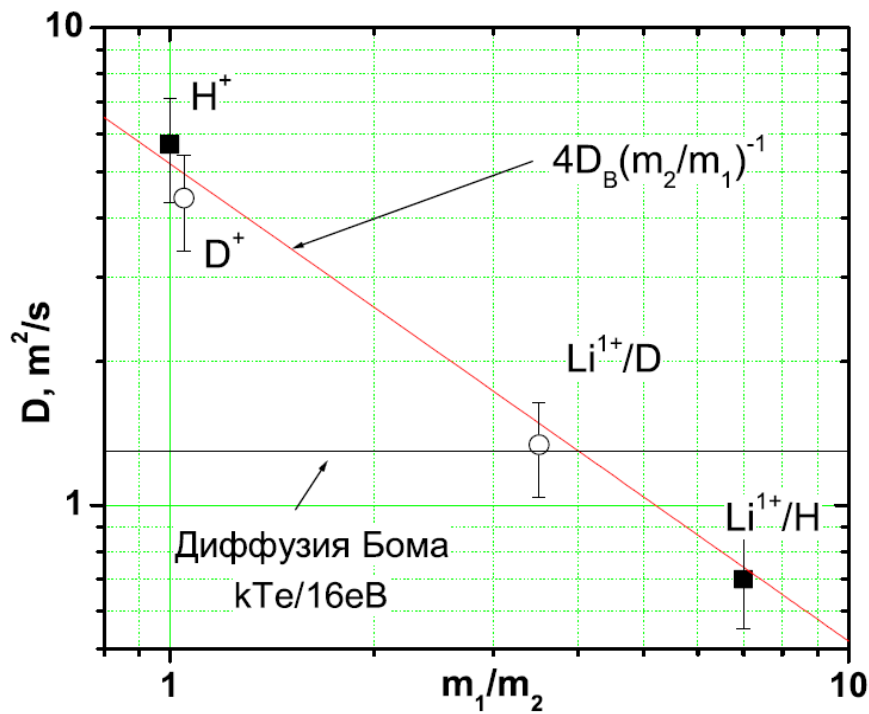


Рисунок 1.9. Значения коэффициентов поперечной диффузии для ионов дейтерия, водорода и лития

Из проведенных расчетов видно, что коэффициенты поперечной диффузии дейтерия и водорода в пределах точности эксперимента не отличаются, в то время как коэффициенты поперечной диффузии ионов лития в дейтериевой и водородной плазме отличаются примерно на отношение атомных масс $m_{H,D}/m_{Li}$ от коэффициентов поперечной диффузии дейтерия и водорода. Оценочно получено, что доля ионов лития, которые возвращаются на активную зону лимитера (жидкий металл) и участвуют в циркуляции, составляет величину около 60 % (для данного лимитера), около 30 % осаждается на основание лимитера.

По всем проведенным работам можно сделать вывод, что в токамаке Т-11М получены стабильные квазистационарные режимы с температурой поверхности лимитера лития от 580 °С до 700 °С, тепловой нагрузкой на контактную поверхность около 20 МВт/м². Закономерности удаления лития с поверхности соответствуют известным физическим моделям. При работе с "горячей" литиевой диафрагмой был определен режим с поверхностным радиационным слоем, который излучает до 70% от общих радиационных потерь. Использование лития в экспериментах привело к снижению рециклинга водорода. Кроме того, были определены температурные интервалы десорбции изотопов водорода (от 320 °С до 500 °С) и гелия (от 50 °С до 100 °С) из лития. Результаты, полученные в литиевых экспериментах, заключаются в том, что литий можно успешно использовать в качестве возобновляемого материала для защиты энергоемких элементов первой стенки ТЯР.

В заключение обзора выполненных на сегодняшний момент исследований на плазмо-физических установках и действующих токамаках, где в той или иной степени, в экспериментах, применялись литий или литиевые КПС можно сделать следующие выводы:

– во всех рассмотренных экспериментах было отмечено, что литиизация камеры приводила к эффекту геттерирования литием остаточных газов в разрядных камерах токамаков и по данным масс-спектрометрических

измерений было видно, как при прогреве открытой поверхности лития в вакуумной камере менялись парциальные давления паров воды и водорода;

– технология инъекции лития в токамак была чрезвычайно эффективна для контроля параметров пристеночной и диверторной плазмы, существенного увеличения доли распределенных по первой стенке радиационных потерь, снижения тепловых нагрузок дивертора, а также для кондиционирования первой стенки. Испаренный литий формировал тонкий обновляемый слой над всей поверхностью первой стенки и диверторных пластин;

– критическим вопросом для всех плазменных установок являлось загрязнение примесями центральных областей плазменного шнура. Главным сюрпризом всех литиевых экспериментов на токамаках и стеллараторе стало весьма незначительное проникновение лития в центр шнура. После проведения литиизации, не зависимо от метода, внутренних поверхностей (стенки, лимитера, дивертора) токамаков и стелларатора, эффективный заряд плазмы Z_{eff} , который обычно приближался к 2, падал почти до 1. Линии примесей металла, углерода и кислорода практически исчезали из оптических и UV спектров таким образом, что в них оставалось доминировать только литиевое излучение. Существенно снижалась вероятность образования ELM – ов;

– литиизация камеры существенно снижает уровень накопления изотопов водорода (третия) в ОПМ, что очень важно с точки зрения безопасной эксплуатации токамаков.

Стоит отметить, что и в настоящий период на данных токамаках, а также и на других действующих токамаках ведутся исследования с применением лития и литиевых технологий.

1.3 Исследования по взаимодействию изотопов водорода с литийсодержащими материалами в условиях нейтронного излучения

Как отмечалось раньше экспериментальных данных о влиянии нейтронного облучения на параметры взаимодействия изотопов водорода с жидким литием найти не удалось, а данных по наработке и выходу трития из лития в жидкой фазе при нейтронном облучении очень ограниченное количество, поэтому в обзоре описывается работа по генерации и выделению трития и свинцово-литиевой эвтектики.

С 1991 года в Японском исследовательском реакторе на быстрых нейтронах "YAYOI", расположенном в Токийском университете, проводились эксперименты по определению основных параметров взаимодействия изотопов водорода с свинцово-литиевой эвтектикой $Li_{17}Pb_{83}$ в рамках программы TREXMAN (Tritium Release Experiment from Molten Li –Pb alloy under Neutron Irradiation).

Эксперименты по определению химической формы и скорости выделения трития из расплавленной эвтектики $Li_{17}Pb_{83}$ [77]. Общая схема проводимых экспериментов приведена на рисунке 1.10. Облучательное устройство, содержащее образец $Li_{17}Pb_{83}$ массой 80 г, термоизоляцию, нагреватель и термопары, помещалось в экспериментальный канал реактора (см. рис. 1.11).

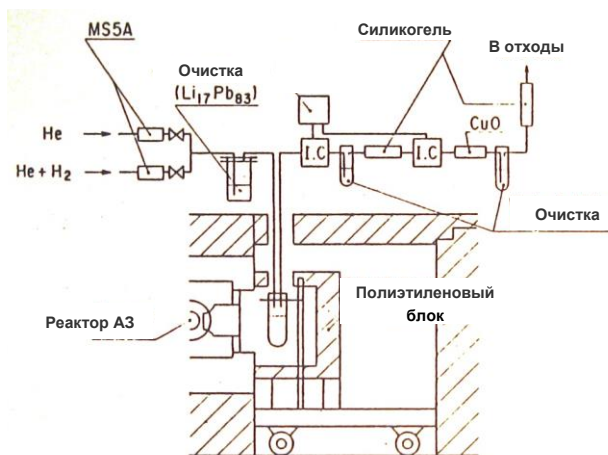


Рисунок 1.10. Схема экспериментов по исследовательской программе TREXMAN

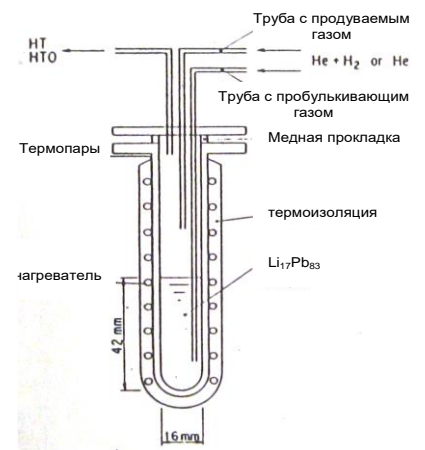


Рисунок 1.11. Схема ячейки облучательной ампулы

Экспериментальная установка состояла из трех основных частей: системы подачи газа-носителя, внутриреакторного осветительного устройства и системы контроля и извлечения трития. Для увеличения степени отражения нейтронов в экспериментах ампулу излучения окружают полиэтиленовыми элементами. Поток тепловых нейтронов реактора в эксперименте составлял 10^8 - 10^9 см⁻², а уровень воспроизводства трития составлял 4,7 Бк/с на 1 г лития. Диапазон исследуемой температуры пробы от 300 °С – 700 °С. образовавшийся тритий несли газ носитель (гелий с разным содержанием водорода). Концентрация трития в газе носителе непрерывно измерялась двумя ионизирующими камерами (ИК). После превращения растворимых компонентов трития (ТО, Т₂О) в первый водяной пузырь, а нерастворимых компонентов (НТ, Т₂) в тритированную воду на катализаторе CuO, вторым.

Общая концентрация трития регистрировалась первой ИК, концентрация водонерастворимых компонентов регистрировалась второй ИК. Тритий в барботерах регистрировался жидкой сцинтилляционной системой.

Было определено, что более 99,9 % трития, образованного в эвтектике под действием облучения при температурах от 400 °С до 700 °С, входило в состав водонерастворимых соединений НТ и Т₂ для всех композиций транспортирующего газа. Количество выделяющегося трития прямо пропорционально зависит от парциального давления водорода в транспортирующем газе и от температуры транспортирующего газа.

Эксперименты по определению коэффициента диффузии трития в $Li_{17}Pb_{83}$ при повышенных температурах [78]. Исследования проводились с использованием ампульного устройства, приведенного на рисунке 1.1.12.

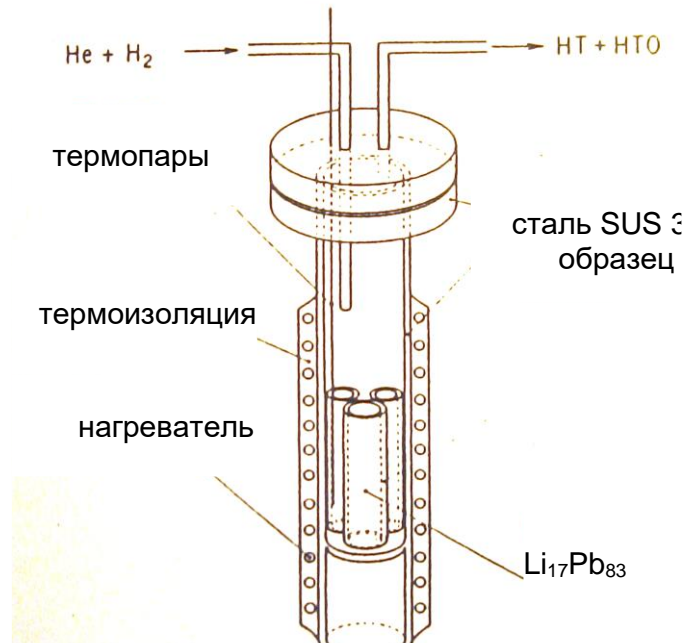


Рисунок 1.12. Схематичное изображение активной ячейки облучательной ампулы

Три цилиндрических контейнера из α -железа, заполненные эвтектикой, были помещены на дно экспериментальной ампулы, оснащенной термопарой, обогревателем и теплоизоляцией. Выделенный тритий был собран с газом-носителем, состоящим из гелия и водорода ($P_{H_2} = 0; 10; 100; 1000; 3000; 10000$ Па). Тритий регистрировался одновременно с двумя ионизационными камерами (ИК). Температура эвтектики варьировалась от $300\text{ }^\circ\text{C}$ до $700\text{ }^\circ\text{C}$.

Тритий выделялся в основном в виде нерастворимых в воде соединений HT и T_2 . Время нахождения трития в экспериментальной системе уменьшалось с ростом давления водорода в продувочном газе вплоть до 1000 Па, и оставалось постоянным при давлении свыше 1000 Па. Это дает основание предполагать, что выход трития определяется только процессом диффузии в эвтектике и железном контейнере при давлении водорода больше 1000 Па. Рассчитанное значение коэффициента диффузии ($\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$) немного превышало значения, полученные другими авторами

$$D = 2,50 \cdot \frac{10^{-7} \exp\left(-27,0 \frac{\text{кДж}}{\text{МОЛЬ}}\right)}{RT} \quad (1.20)$$

Эксперименты по определению коэффициента массопереноса трития в свинцово – литиевой эвтектике $Li_{17}Pb_{83}$ в окружающий газ [79]. Свинцово-литиевая эвтектика помещалась в цилиндрический контейнер из оксида алюминия (см. рис.1.13).

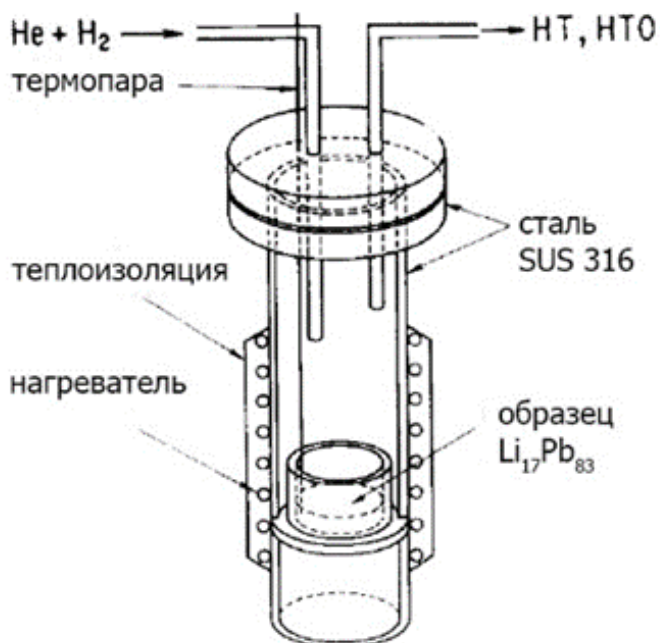


Рисунок 1.13. Схематичное изображение активной ячейки облучательной ампулы

Уровень увеличения трития на 1 г лития при облучении в реакторе составил 4 Бк/с. В качестве газа носителя использовался гелий с разной концентрацией водорода (от 0 ppm до 100 000 ppm). Тритий регистрировался одновременно с двумя ионизационными камерами (ИК): первый ИК измерял общий уровень трития, а второй измерял нерастворимые в воде соединения трития. Температура образца эвтектики, а также состав газа-носителя оставались стабильными во время каждого эксперимента.

По результатам экспериментов основным процессом, ответственным за выделение трития из эвтектики, является его диффузия в тонких жидких пленках. Была рассчитана толщина пленки, равная 0,2 мм.

Было замечено, что коэффициент массопереноса в эвтектике увеличивается с увеличением парциального давления H_2 в выдувном газе He до 10^4 Па. Выражение, полученное для коэффициента переноса выглядит следующим образом;

$$K_D = 2,5 \cdot 10^{-3} \exp\left(-30,7 \frac{\frac{\text{кДж}}{\text{МОЛЬ}}}{RT}\right). \quad (1.21)$$

Полученные результаты хорошо согласуются с предыдущими работами в этой области.

1.4 Постановка задачи

Анализ работ по использованию литиевых технологий в установках управляемого термоядерного синтеза, показал, что взаимодействие изотопов водорода с жидким литием, является трудной проблемой в области физики термоядерных реакторов. Исследования с жидким литием и литиевой КПС проведенных на действующих токамаках и плазмо –физических установках показали перспективность использования данных материалов в установках управляемого термоядерного синтеза, которая заключается в следующем:

1. Уменьшение энергетических нагрузок на первую стенку и дивертор за счет переизлучения энергии на периферии плазменного шнура на нейтральных атомах лития, что облегчает проблему отвода тепла от внутрикамерных элементов;

2. Повышение плазменных параметров термоядерных реакторов за счет уменьшения эффективного зарядового числа плазмы близкого к единице

3. Способность жидкого лития самообновлять поверхность, взаимодействующую с плазмой, позволит разработать внутрикамерные устройства нового типа с приемной поверхностью, обладающих практически неограниченным ресурсом;

4. Позволяет обеспечить лимитированное присутствие в плазме продуктов эрозии ОПМ что снижает накопление трития во внутрикамерных элементах термоядерного реактора.

Однако у этих установок нет возможности реализовать такой фактор воздействия, как влияние нейтронного излучения высокой плотности.

Экспериментальных данных о влиянии реакторного облучения на параметры взаимодействия изотопов водорода с жидким литием найти не удалось. Наряду с исследованием процессов транспорта изотопов водорода в литии, отдельным направлением является изучение механизмов генерации и выделения трития из лития в жидкой фазе. Во многих случаях реакторные эксперименты по генерации трития проводились, но это были в основном работы по облучению литиевых керамик и свинцово – литиевой эвтектики.

Таким образом имеется проблема, связанная с выявлением механизмов и разработкой моделей, позволяющих описать процессы сорбции (десорбции) изотопов водорода жидким литием, а также наработки и выделения трития из лития в жидкой фазе в процессе нейтронного облучения.

Целью работы является исследование процессов взаимодействия жидкого лития с изотопами водорода в условиях нейтронного облучения. Описание механизмов и определение параметров этого взаимодействия (генерация трития и его выделение, растворимость, сорбция, десорбция изотопов водорода).

Глава 2. Техника и методы проведения реакторных экспериментов

Для проведения исследований процессов взаимодействия жидкого лития с изотопами водорода в условиях нейтронного облучения были использованы исследовательский гетерогенный ядерный реактор корпусного типа на тепловых нейтронах ИВГ.1М; экспериментальный реакторный стенд ЛИАНА; специально разработанные экспериментальные ампульные устройства (АУ) для облучения жидкого лития; методики проведения реакторных экспериментов, с использованием абсорбционного, масс – спектрометрического методов и термостимулированной десорбции.

2.1 Исследовательский ядерный реактор и экспериментальный стенд

В качестве источника нейтронного и гамма –излучений в экспериментах по исследованию процессов взаимодействия жидкого лития с изотопами водорода в условиях нейтронного облучения использовался исследовательский ядерный реактор ИВГ.1М.

Реактор ИВГ.1М – исследовательский водо-водяной гетерогенный корпусного типа ядерный реактор на тепловых нейтронах с легководными замедлителем и теплоносителем, и бериллиевым отражателем нейтронов. Активная зона реактора содержит 30 водоохлаждаемых технологических каналов (ВОТК), установленных в ячейках трех кольцевых рядов. В бериллиевом отражателе располагаются 10 регулирующих барабанов. В центральной части реактора расположен центральный петлевой канал с бериллиевым вытеснителем и корпусом физического экспериментального канала (ФКЭ) в центре. В бериллиевом замедлителе расположены 12 стержней системы компенсации реактивности реактора.

Корпус ФКЭ используется в качестве канала для размещения ампульного устройства, при этом центр активной зоны реактора находится на расстоянии 1890 мм от верхнего торца удлинителя ФКЭ. Удлинитель

предназначен для предотвращения попадания внутрь ФКЭ воды охлаждения реактора. Диаметр канала составляет 67 мм.

На рисунке 2.1 представлена упрощенная конструкция исследовательский реактора ИВГ.1М. В таблицах 2.1 и 2.2 представлены основные характеристики реактора. Характеристика реакторного излучения, распределение потока нейтронов и гамма квантов по высоте экспериментального канала (ФКЭ) приведены на рисунках 2.1 – 2.5.

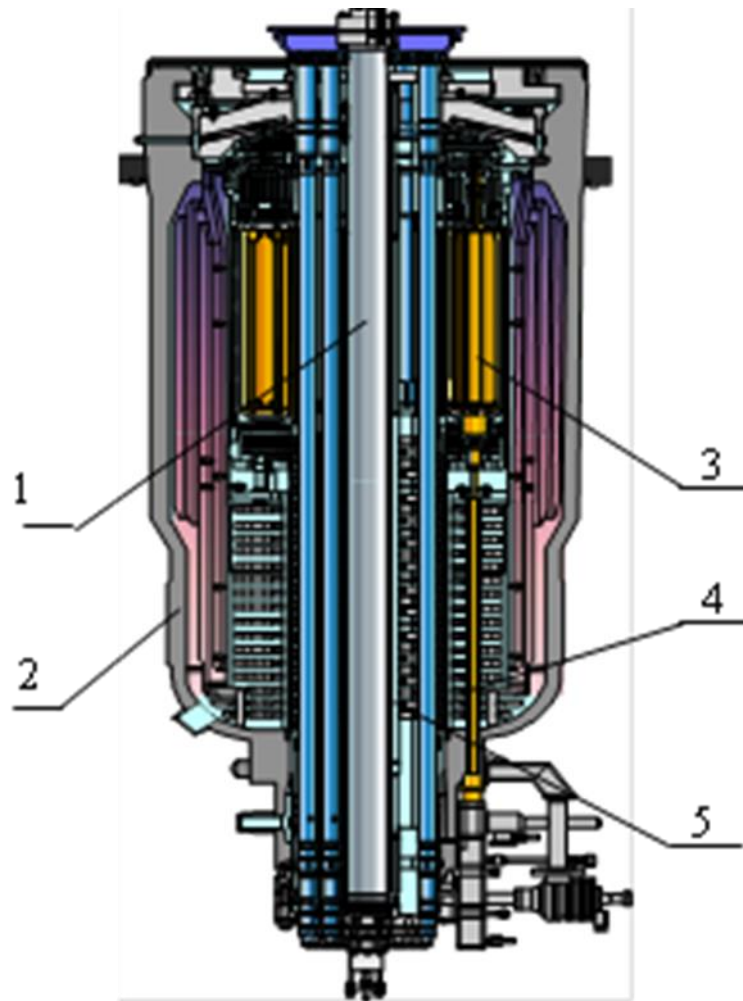


Рисунок 2.1. Схема исследовательского реактора ИВГ.1М: 1 – центральный канал, 2 – корпус реактора, 3 – регулирующий барабан (РБ), 4 – привод исполнительного механизма РБ, 5 – железобетонная защита

Таблица 2.1 – Нейтронный поток на уровне центра активной зоны на 6 МВт

Энергетическая группа	до 0,67 эВ	от 0,67 эВ до 0,1 МэВ	от 0,1 до 10 МэВ	Интегральный поток
Нейтронный поток, $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$	$(0,87 \pm 0,06) \cdot 10^{14}$	$(0,42 \pm 0,03) \cdot 10^{14}$	$(0,22 \pm 0,01) \cdot 10^{14}$	$(1,50 \pm 0,10) \cdot 10^{14}$

Таблица 2.2 – Характеристики исследовательского реактора ИВГ.1М

Тепловая мощность	6 МВт
Экв. диаметр активной зоны	548 мм
Высота активной зоны	800 мм
Топливо	сплав U и Zr
Обогащение по ^{235}U	90%
Загрузка ^{235}U	4,6 кг
Теплоноситель	вода

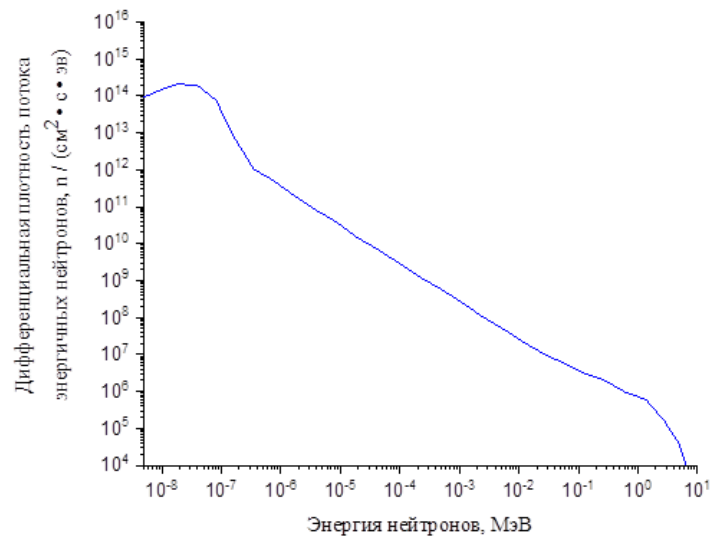
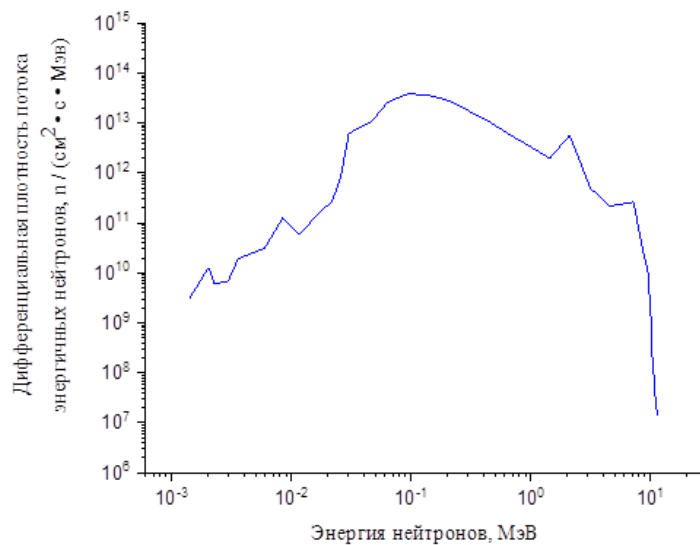


Рисунок 2.2. Спектр нейтронов.

Рисунок 2.3. Спектр γ – излучения.

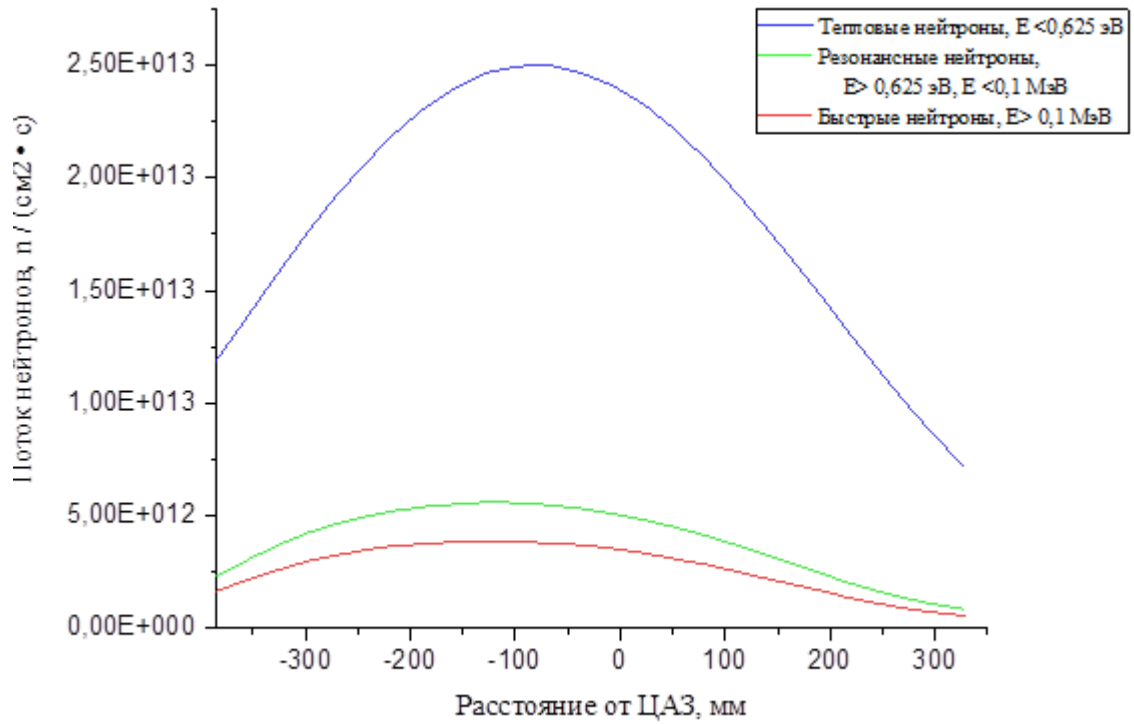
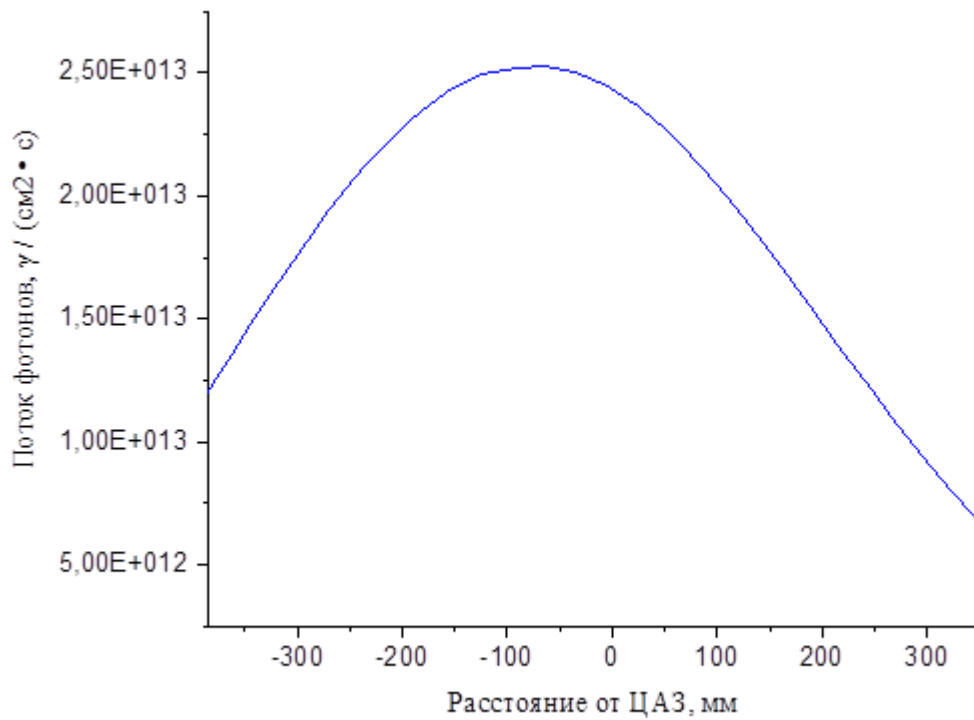


Рисунок 2.4. Распределение потока нейтронов по высоте ФКЭ

Рисунок 2.5. Распределение потока γ – излучения по высоте ФКЭ

Для определения параметров взаимодействия водорода и его изотопов (генерация трития и его выделение, растворимость, сорбция, десорбция) с жидким литием наиболее информативными являются абсорбционный, масс – спектрометрический методы и метод термостимулированной десорбции. Практическая реализация данных методов выдвигает ряд требований к используемой аппаратуре.

Используемая аппаратура должна обеспечивать максимально широкий диапазон изменения внешних условий (температура образца, давление водорода, длительность экспериментов и т.д.), необходимую частоту измерений, прием и обработку результатов по заданным программам. Кроме того, точность, необходимая при практической реализации методов может быть обеспечена лишь при автоматическом управлении параметрами эксперимента, а необходимость предоставления результатов в виде различных зависимостей требует дискретного изменения этих параметров.

С целью обеспечения радиационной безопасности исследователей при проведении реакторных экспериментов управление экспериментальным оборудованием должно осуществляться дистанционно из пульта оператора.

Для реализации данных методов был разработан и использован в облучательных экспериментах стенд ЛИАНА, расположенный в реакторном зале непосредственно рядом с ИВГ.1М. Экспериментальный стенд ЛИАНА (см. рис. 2.6, 2.7) позволяет проводить эксперименты по изучения процессов взаимодействия изотопов водорода с конструкционными материалами ЯР и ТЯР различными методами, при температурах образца от 20 °С до 1300 °С. Экспериментальный стенд функционально состоит из ампульного устройства (АУ) и рабочего блока. АУ состоит из экспериментальной ячейки с исследуемым образцом, электрического нагревателя, устройства газового охлаждения, термопар и соединительной трубы с фланцем.

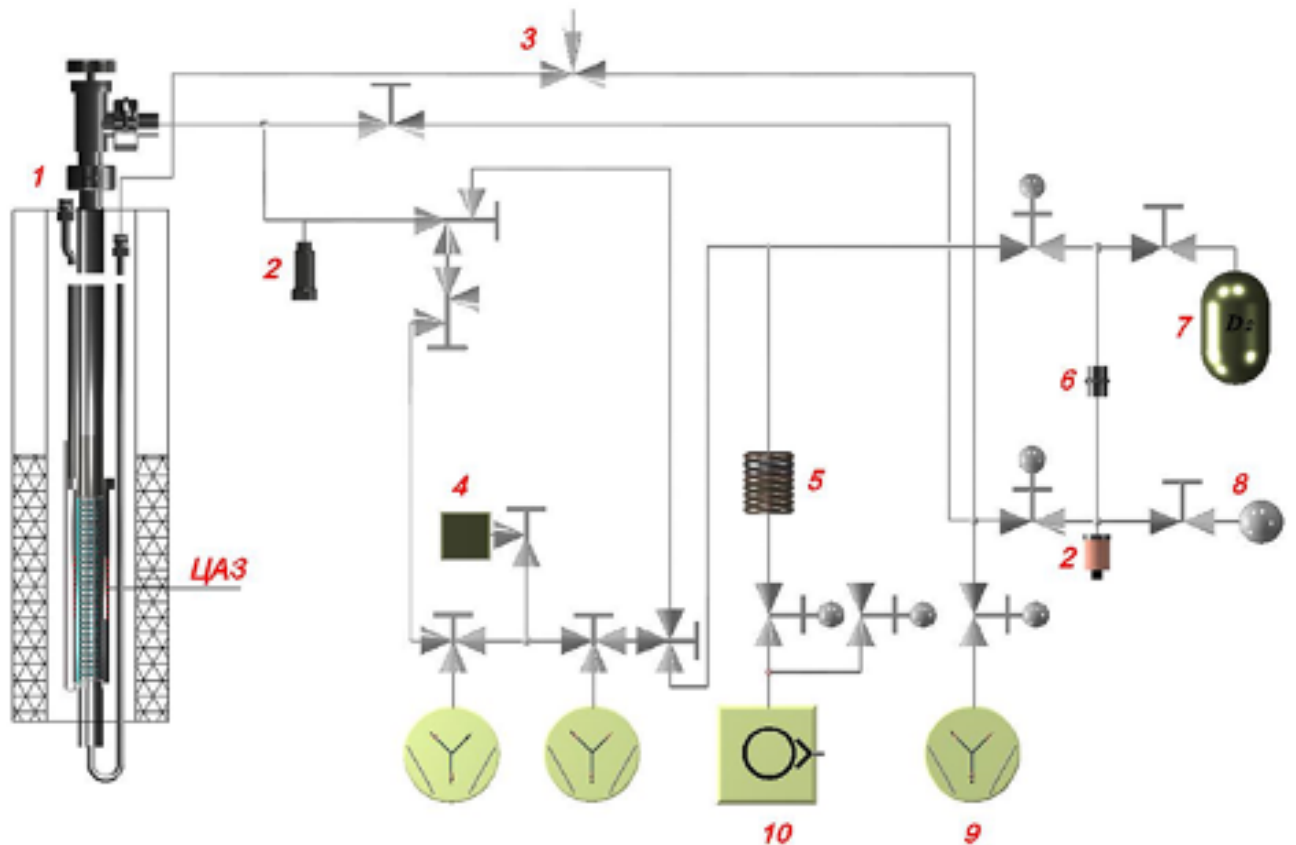


Рисунок 2.6. Схема экспериментального стенда «Лиана»: 1 – ампульное устройство, 2 – датчики давления, 3 – регулятор подачи газа (натекатель), 4 – масс – спектрометр, 5 – азотная ловушка, 6 – палладий –серебряный фильтр, 7 – баллон с газом, 8 – емкость со спектрально чистым газом, 9 – высоковакуумные насосы, 10 – форвакуумный насос

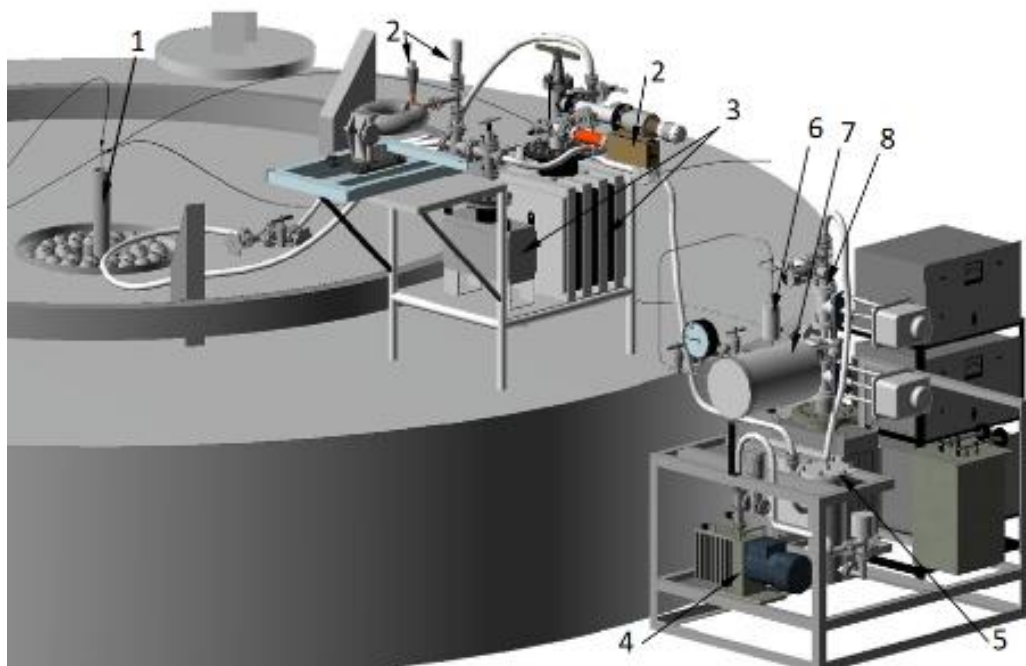


Рисунок 2.7. 3Д изображение стенда ЛИАНА: 1 – ФКЭ; 2 – масс –спектрометры; 3 – высоковакуумные насосы; 4 –форвакуумный насос; 5 – азотная ловушка; 6 – водородный фильтр; 7 – емкость для спектрально чистого водорода; 8 – вакуумные вентили

Рабочий блок в свою очередь функционально состоит из вакуумной системы, системы очистки и напуска изотопов водорода и информационно – измерительного комплекса.

Вакуумная система экспериментального стенда позволяет провести подготовку стенда к работе и создать необходимые условия для проведения экспериментов. Вакуумная система состоит из форвакуумной и высоковакуумной частей, соединенных между собой трубопроводами с запорной арматурой. Данная система оснащена сухим спиральным вакуумным насосом, турбомолекулярным и магниторазрядными насосами. Сухой спиральный насос служит для предварительной откачки всей системы и обеспечивает минимальное давление для начала работы высоковакуумных насосов. Высоковакуумные насосы создают необходимые условия (давление) в объеме ампульного устройства, измерительного тракта и в системе напуска изотопов водорода.

Система очистки и напуска экспериментального стенда обеспечивает напуск спектрально чистого водорода и его изотопов в ампульное устройство с исследуемым образцом. Очистка водорода и его изотопов осуществляется с помощью палладий-серебряного фильтра. Спектрально чистый водород для экспериментов накапливается в ресиверную емкость до заданного давления. Система очистки и напуска оснащена вакуумными и газовыми трубопроводами, запорной арматурой и вакуумным насосом для обеспечения периодической откачки и напуска водорода на входной стороне диффузионного фильтра.

Информационно-измерительный комплекс (ИИК) обеспечивает контроль и управление параметров стенда в процессе подготовки и проведения научных исследований, и масс –спектрометрическую регистрацию проникающих или выделяющихся газов из исследуемого образца.

2.2 Устройства для проведения реакторных экспериментов с литием

Экспериментальные устройства, предназначенные для облучения материалов в исследовательских реакторах, классифицируются по способу съема тепла с облучаемых образцов на петлевые и ампульные, а по качеству получаемой в процессе облучения информации – на пассивные и активные.

Петлевые устройства характерны наличием замкнутого контура, в котором циркулирует какой-либо теплоноситель, снимающий тепло с облучаемых образцов и передающий его внешним теплообменным устройствам, размещенным вне пределов реактора.

Ампульные устройства, на все свое многообразие, характерны тем, что генерируемое в них тепло поступает в теплоноситель реактора. Температурный режим образцов обеспечивается либо путем создания определенных термических сопротивлений на пути теплового потока от образцов к теплоносителю реактора (теплоизоляция), либо электроподогревом.

Пассивные облучательные устройства – это такие устройства, в которых проводится только облучение образцов в контролируемых и регулируемых условиях. Исследования влияния облучения на образцы проводятся после извлечения их из реактора.

Активные облучательные устройства позволяют проводить внутрореакторные исследования, т.е. измерять изменение свойств исследуемых образцов непосредственно в процессе их облучения.

В нашем случае были разработаны активные облучательные устройства. Для общей схемы реакторной с образцом литиевой КПС был проведен нейтронно-физический расчет. Нейтронно-физические расчеты были проведены с помощью программы MCNP5. Расчетная модель реактора ИВГ.1М была максимально приближена к существующей конструкции реактора. Графическое представление модели АЗ реактора приведено на рисунке 2.8. Расчетная модель построена с помощью программы MCNP5,

относящейся к числу универсальных программ для решения задач переноса излучения в произвольной трехмерной геометрии с библиотеками констант ENDF/B –5,6.

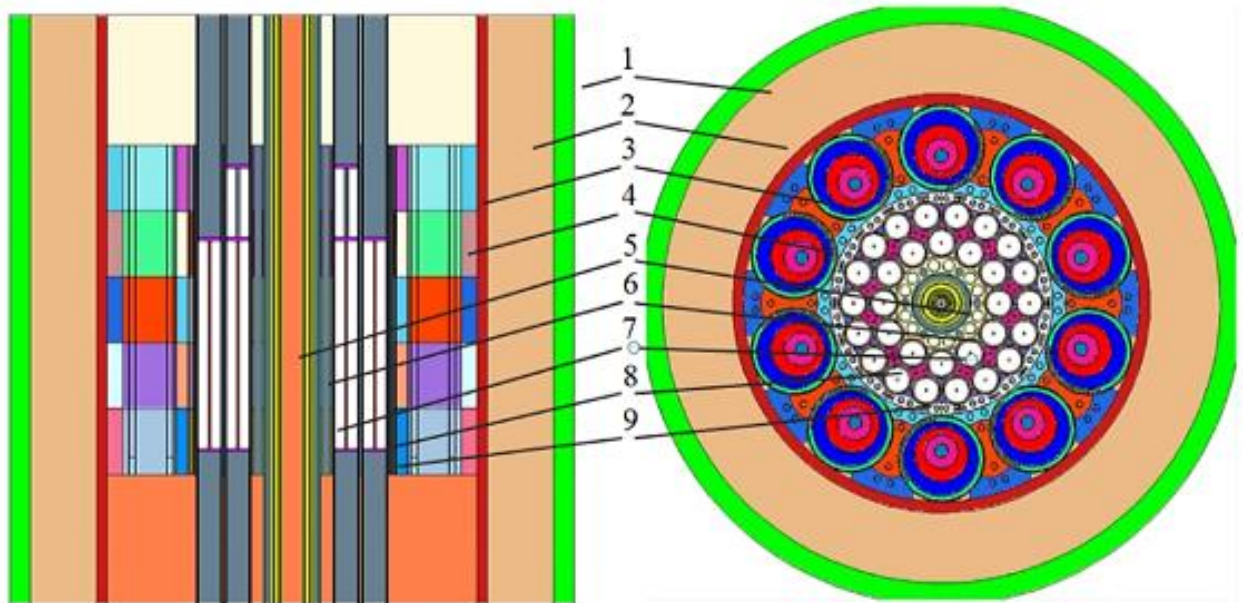


Рисунок 2.8. Расчетная модель реактора ИВГ.1М: 1 – внешний корпус; 2 – боковые экраны; 3 – отражатель; 4 – регулирующие барабаны (РБ); 5 – ФКЭ; 6 – центральная сборка; 7 – стержни компенсации реактивности (СКР); 8 – твэлы; 9 – каналы ВОТК

При подготовке расчетной модели учтены характерные особенности конструкции тепловыделяющей сборки водоохлаждаемого технологического канала (ВОТК), АЗ и органов регулирования, температурные режимы элементов конструкции реактора, включены программные опции наилучшим образом моделирующие процессы взаимодействия нейтронов с веществом. Основные особенности расчетной модели приведены ниже: тепловыделяющая сборка ВОТК, отражатели, вытеснители, регулирующие барабаны (РБ) и физический канал экспериментальный (ФКЭ) заданы гетерогенной структурой; задано двузонное профилирование тепловыделяющей сборки по радиусу; температура топлива и конструктивных элементов реактора принята равной 293 К; предусмотрена возможность изменения положения стержней системы, компенсирующей реактивность и изменения углового положения РБ от 0° (поглощающие элементы направлены в сторону АЗ) до 180° (поглощающие элементы направлены в противоположную сторону от АЗ). Вращение РБ осуществляется по часовой стрелке при виде сверху на

реактор; используемые библиотеки ENDF/B –VI.6 имеют допуски с ошибкой менее 1 % в линейной интерполяции (в программе для получения сечений при необходимой энергии используется линейно –линейная интерполяция); для таких элементов как водород и бериллий используются тепловые библиотеки $s(\alpha, \beta)$, наилучшим образом описывающие процессы рассеяния тепловых нейтронов на молекулах в кристаллических структурах.

В расчетах принималось, что место расположения образца совпадает с центром активной зоны реактора. Температура активной зоны реактора и температура материалов ампульного устройства принималась равной 300 К.

При моделировании экспериментальной ячейка с литиевой КПС, представляющая собой цилиндр диаметром 19 мм и высотой 9 мм, была разбита на две расчетные зоны. Внутренняя расчетная зона представляла собой цилиндр диаметром 18 мм и высотой 9 мм. Внешняя расчетная зона представляла собой полый цилиндр высотой 9 мм с наружным и внутренним диаметрами соответственно 19 и 18 мм. Скорость реакции R_i для изотопа ${}^6\text{Li}$ определялась как

$$R_i(E) = N_0 \int \sigma(E) \cdot f(E) dE, \quad (2.1)$$

где N_0 – ядерная концентрация, атом/ см³; $\sigma(E)$ – микросечение реакции, барн; $f(E)$ – плотность потока тепловых нейтронов в образце, н·см⁻²·с⁻¹.

Результаты расчета представлены на один нейтрон деления в АЗ реактора. Результаты расчета по определению скорости реакции наработки трития в образце литиевой КПС представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Результаты расчета скорости реакции

Расчетная зона	Скорость реакции R_i , см ⁻³ ·с ⁻¹
Внутренняя	$1,14 \cdot 10^{-5}$
Внешняя	$2,01 \cdot 10^{-5}$
Среднее значение по образцу	$1,57 \cdot 10^{-5}$

В результате выполненного нейтронно –физического расчета была рассчитана скорость реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ в образце литиевой КПС в условиях

облучения в реакторе ИВГ.1М. Среднее значение скорости реакции по образцу составило $1,57 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$. Значение скорости реакции во внешнем слое образца в 1,38 раза больше, чем во внутренней зоне. Полученная скорость наработки атомов гелия и трития составила $1,09 \pm 0,15 \cdot 10^{-9}$ моль/с для 1 МВт мощности реактора ИВГ.1М.

Далее для общей схемы ампулы с образцом литиевой КПС определено температурное поле модели экспериментальной ячейки реакторной ампулы при мощности реактора 1, 2 и 3 МВт.

Температурное поле экспериментальной ампулы определялось с помощью программного комплекса ANSYS. Распределение температуры в экспериментальной ампуле обусловлены следующими факторами: энерговыделением в элементах конструкции, конвективным теплообменом, теплообменом в материалах за счет теплопроводности.

При построении расчетной модели ампульного устройства было принято следующее допущение: пространство между нагревателем и корпусом ампулы, а также между нагревателем и трактом охлаждения расчетной модели заполнено азотом.

Модель, построенная для расчета температурного поля ампульного устройства, приведена на рисунке 2.9.

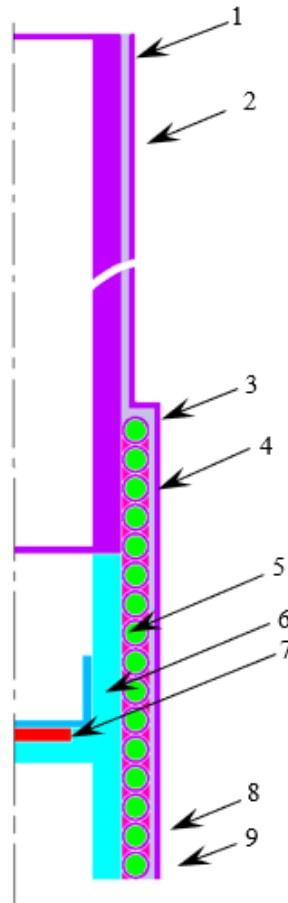


Рисунок 2.9. Расчетная модель ампульного устройства: 1 – корпус ампулы (12Х18Н10Т); 2 – тракт охлаждения; 3 – оболочка нагревателя (сталь); 4 – минеральная изоляция нагревателя; 5 – корпус ампулы (медь); 6 – литиевая КПС; 7 – литий; 8 – азот; 9 – кожух охлаждения (12Х18Н10Т)

Между поверхностью кожуха ампулы и окружающим воздухом теплообмен осуществляется за счет свободной конвекции. При задании граничных условий расчета в данном случае коэффициент теплоотдачи был принят равным $5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$, а температура окружающего воздуха 20 °С .

Передача тепла в азот происходит от нагревателя ампульного устройства и от корпуса ампулы. Для расчета коэффициента теплоотдачи были использованы следующие формулы, приведенные ниже.

Коэффициент теплоотдачи в азот определялся по формуле:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d}, \quad (2.2)$$

где Nu – число Нуссельта для азота; λ – коэффициент теплопроводности для азота при средней температуре, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$; d – гидравлический диаметр тракта охлаждения, м.

Для определения числа Нуссельта необходимо было вычислить число Рейнольдса

$$Re = \frac{G \cdot d}{S \cdot \mu}, \quad (2.3)$$

где G – расход азота, кг/с; μ – коэффициент динамической вязкости азота при средней температуре, Па · с.

Если полученное в ходе расчета значение числа Рейнольдса меньше 2000, это означает ламинарный режим течения газа. При таком режиме течения число Нуссельта определяется как

$$Nu = 1,4 \cdot \left(Re \cdot \frac{d}{l} \right)^{0,4} \cdot Pr^{0,33}, \quad (2.4)$$

где l – высота участка охлаждения, м; Pr – число Прандтля для азота $Pr = 0,71$.

В случае, когда число Рейнольдса превышает 2000, режим течения газа считается турбулентным. При данном режиме течения число Рейнольдса для газа вычисляется по формуле:

$$Nu = 0,018 \cdot Re^{0,8}. \quad (2.5)$$

При определении коэффициента теплоотдачи в азот тракт охлаждения был условно разбит на два расчетных участка: верхний (от места подачи азота до нагревателя) и нижний (оснащенный нагревателем).

При прохождении через тракт охлаждения азот нагревается, что влечет за собой изменение его теплофизических свойств, а следовательно, и коэффициента теплоотдачи. Первоначально при расчете коэффициента теплоотдачи в азот и определения температурного поля модели ампульного устройства средняя температура азота принималась равной 20 °С, а затем с помощью полученного температурного поля была рассчитана температура азота на выходе из тракта охлаждения.

При определении температуры азота на выходе для каждого расчетного участка использовалось следующее равенство

$$G \cdot Cp \cdot (T_2 - T_1) = a \cdot F_1 \cdot (T_{cm1} - T_{cp}) + a \cdot F_2 \cdot (T_{cm2} - T_{cp}), \quad (2.6)$$

где C_p – удельная теплоемкость азота при средней температуре, Дж/(кг×°С); T_1 , T_2 – температура азота на входе и выходе из расчетного участка соответственно, °С; F_1 – площадь внешней поверхности ампулы (либо нагревателя) расчетного участка, м²; F_2 – площадь внутренней поверхности кожуха на участке, м²; T_{cm1} – средняя температура внешней поверхности ампулы (либо нагревателя) расчетного участка, °С; T_{cm2} – средняя температура внутренней поверхности кожуха на участке, °С.

В соответствии с равенством (2.6) температура азота на выходе из расчетного участка определялась по формуле:

$$T_2 = \frac{a \cdot (F_1 \cdot T_{cm1} + F_2 \cdot T_{cm2}) - a \cdot T_1 \cdot 0,5 \cdot (F_1 + F_2) + G \cdot C_p \cdot T_1}{G \cdot C_p + 0,5 \cdot a \cdot (F_1 + F_2)}. \quad (2.7)$$

С использованием полученного значения температуры азота на выходе из каждого расчетного участка уточнялась средняя температура азота на участках, а также коэффициент теплоотдачи в азот. Расчет температурного поля модели ампульного устройства повторялся с использованием уточненных данных. Таким образом, расчет проводился методом последовательных приближений до тех пор, пока средняя температура азота, полученная в i –той итерации, не будет отличаться от температуры, полученной в $(i-1)$ –ой итерации на минимально заданную величину.

В таблице 2.4 приведены необходимые значения расхода азота для поддержания заданных температур образца на стационарном режиме при различной мощности работы реактора.

Таблица 2.4 – Результаты теплофизического расчета

Температура образца, °С	Расход азота, г/с		
	1 МВт	2 МВт	3 МВт
200	0,44	2,4	5,0
250	0,25	1,5	2,1
300	0,12	1,1	1,7
350	0,08	0,6	1,3

На рисунке 2.10 приведено стационарное температурное поле модели ампульного устройства при расходе азота охлаждения 1,3 г/с на уровне мощности реактора 3 МВт. Температура указана в градусах Цельсия.

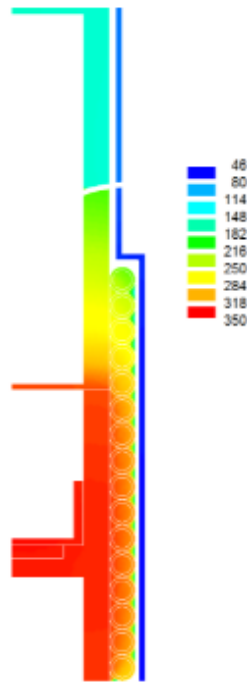


Рисунок 2.10. Температурное поле модели ампульного устройства

В результате проведенных теплофизических расчетов определено, что:

- при мощности реактора 3 МВт для обеспечения стационарной температуры образца от 200 °С до 350 °С расход азота охлаждения должен составлять от 5 до 1,3 г/с;

- при мощности реактора 2 МВт для обеспечения требуемой температуры образца необходим расход азота от 0,6 до 2,4 г/с;

- на уровне мощности реактора 1 МВт для обеспечения температуры образца в стационарном режиме не выше 200 °С достаточно расхода азота не более 0,5 г/с.

В соответствии с выполненными нейтронно-физическими и теплофизическими расчетами была разработана конструкция облучательного ампульного устройства для проведения реакторных экспериментов по исследованию процессов генерации и выделения трития в образцах литиевых КПС в условиях реакторного излучения. На основании выполненных

конструкторских разработок и чертежей изготовлены комплектующие детали и произведена сборка экспериментального ампульного устройства с образцом литиевой КПС (см. рис. 2.11).

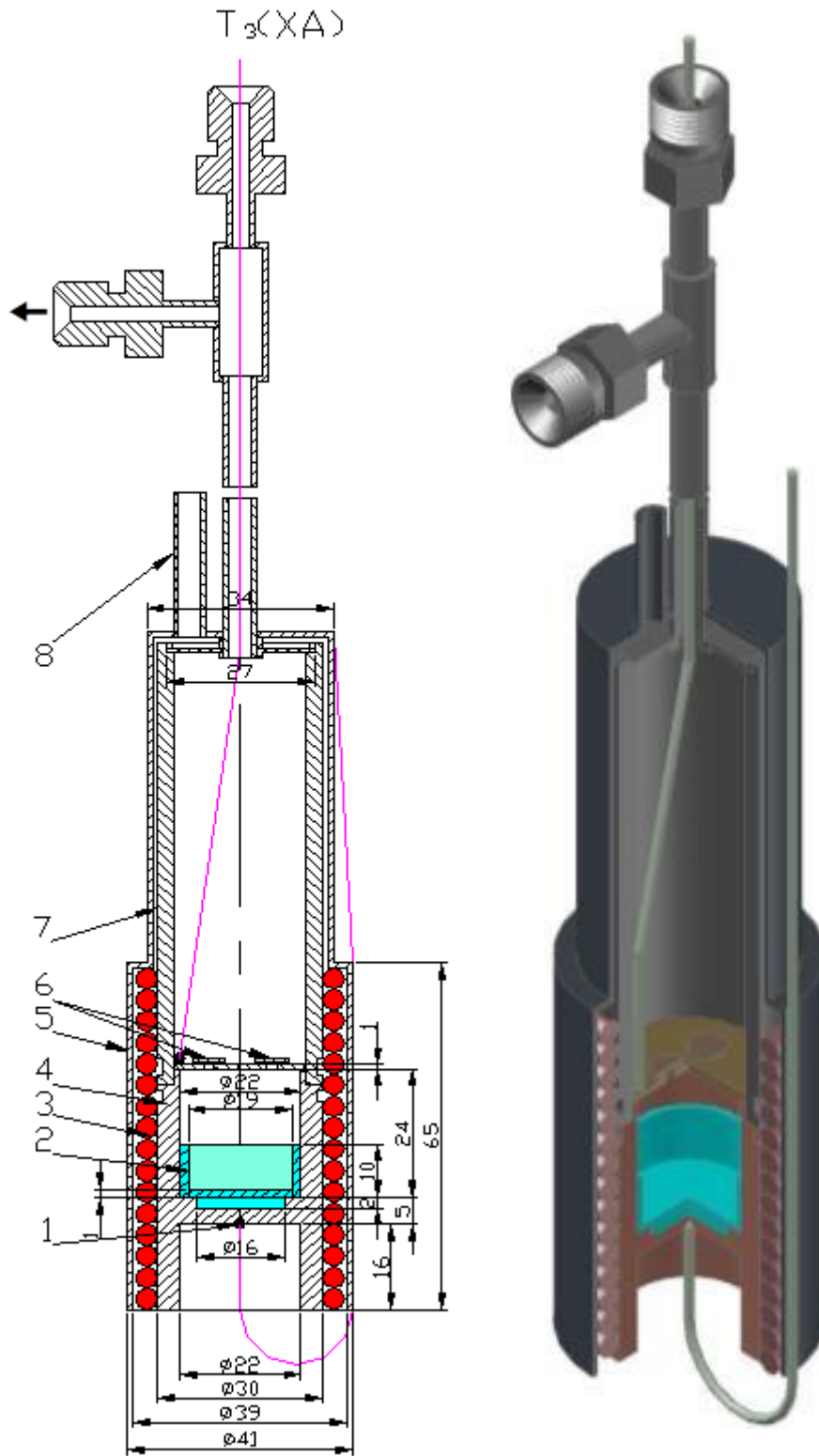


Рисунок 2.11. Схема и 3D –модель ампульного устройства образцом литиевой КПС: 1 – термопары; 2 – литиевая КПС (масса лития – 0,42 г); 3 – нагреватель (КТМС ХК); 4 – корпус ампулы (12Х18Н10Т); 5 – кожух охлаждения (12Х18Н10Т); 6 – отражательные экраны (12Х18Н10Т); 7 – корпус ампулы (12Х18Н10Т); 8 – труба подачи азота

Ампульное устройство представляет из себя герметичную металлическую капсулу с помещенным в нее образцом литиевой КПС и оснащена штуцером для соединения ее с вакуумной и измерительной системами стенда ЛИАНА. На наружной части капсулы установлен омический нагреватель обеспечивающий необходимые температурные режимы в проводимых экспериментах. Также на ампульном устройстве смонтирована система охлаждения капсулы газообразным азотом и установлены термопары как снаружи ампулы так и внутри (во внутреннюю часть термопара заведена через гермоввод). По окончании сборки и вывполненого монтажа экспериментального ампульного устройства были выполнены стандартные процедуры проверки. Корпус собранного ампульного устройства и сварные соединения при помощи масс –спектрометра RGA –100 проверены на герметичность методом обува гелием. Натекание в ампульное устройство составляло не более $4,5 \cdot 10^{-14}$ Па·м³/с, что вполне соответствует вакуумным требованиям проведения экспериментов.

Для проведения абсорбционных экспериментов, экспериментов по генерации и выделению трития из жидкого лития, а также ТДС экспериментов было разработано и изготовлено ампульных устройство (см. рис.) с экспериментальной ячейкой, в которой размещался исследуемый образец.

Ампульное устройство снабжено омическим нагревателем (провод КТМС ХК мощностью 200 Вт), предназначенным для нагрева исследуемого образца и обеспечения поддержания выбранных температурных режимов в проводимых экспериментах. Для контроля и регистрации температуры образцов установлены две термопары ХА. Так же для поддержания исследуемой температуры образцов при проведения реакторных экспериментов на ампульном устройстве смонтирована система охлаждения в виде одетого на экспериментальную ячейку чехла. Охлаждение предусматривает продувку газообразного азота через чехол. Корпус ампульного устройства изготовлен из стали 12Х18Н10Т.

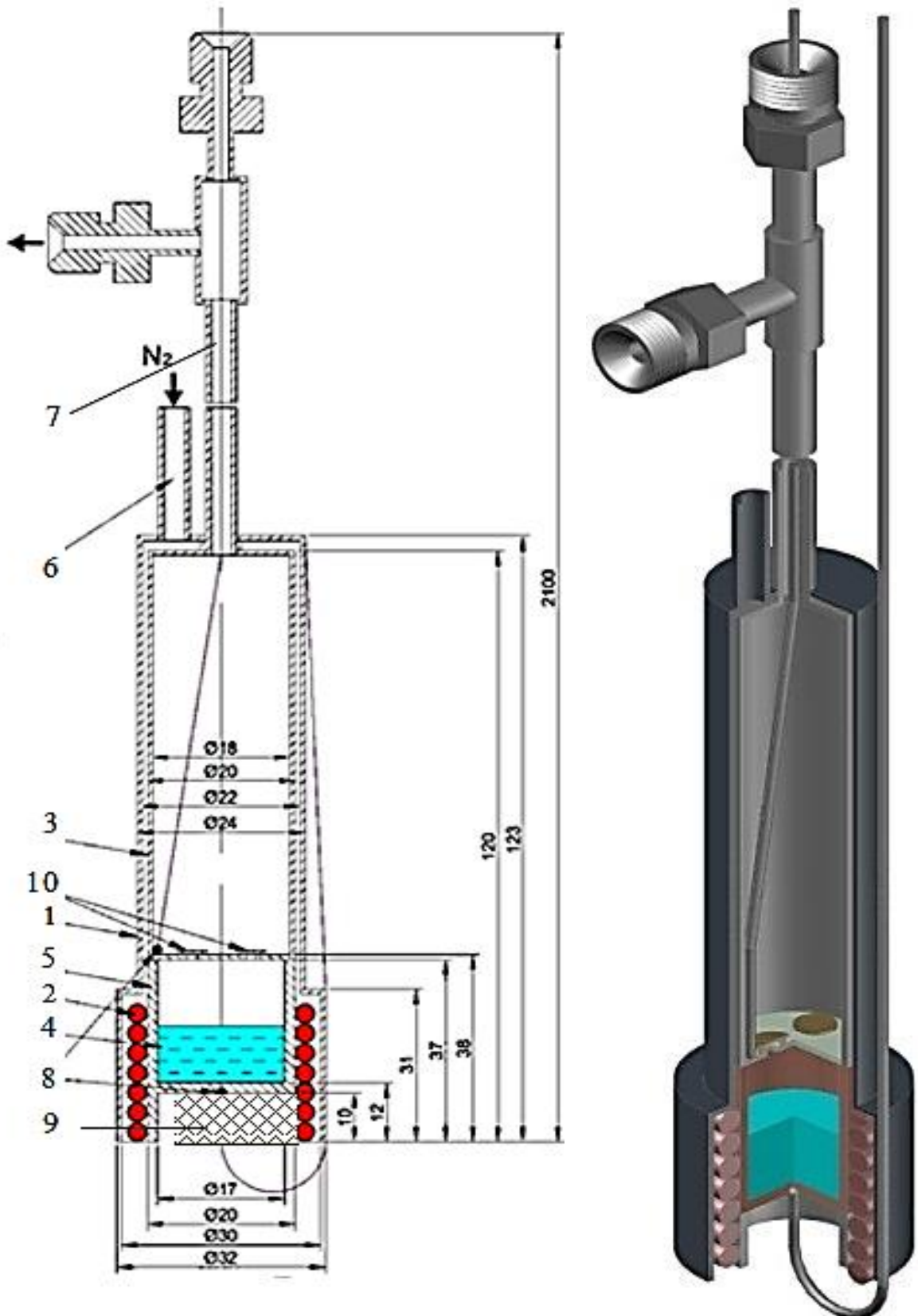


Рисунок 2.12. Схема и 3D –модель ампульного устройства: 1 – кожух ампулы; 2 – нагреватель; 3 – корпус экспериментальной ячейки; 4 – образец; 5 – дно ампулы; 6 – труба подачи азота; 7 – корпус ампулы; 8 – термопары; 9 – теплоизоляция; 10 – экранный отражатель

Нейтронно-физические расчеты ампульного устройства были проведены с помощью программы MCNP5, относящейся к числу универсальных программ для решения задач переноса излучения в произвольной трехмерной геометрии, с библиотеками констант ENDF/B –5,6.

В расчетах принималось, что место расположения образца совпадает с центром активной зоны реактора. Температура активной зоны реактора и температура материалов ампульного устройства принималась равной 20 °С.

Расчеты были выполнены для трех миллионов историй. Результаты расчетов энерговыделения в элементах конструкции ампульного устройства и образце лития при мощности реактора 1 МВт представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты расчетов энерговыделения

Элемент конструкции	Удельная мощность энерговыделения, Вт\см ³
Кожух	1,00
Дно ампулы	1,21
Корпус ампулы	0,75
Теплоизоляция	0,02
Образец лития	16,57

Полученные результаты нейтронно-физических расчетов были использованы в дальнейшем при проведении теплофизических расчетов и выборе режимов проведения реакторных экспериментов.

Температурное поле ампульного устройств определялось с помощью программного комплекса ANSYS. Распределение температуры ампульного устройства зависело от следующих факторов: энерговыделение в элементах конструкции, конвективный теплообмен, теплообмен в материалах за счет теплопроводности. Энерговыделение в кожухе ампульного устройства по конструктивным причинам практически не влияет на распределение температуры в корпусе ампулы, поэтому в данных расчетах не учитывалось.

На рисунке 2.13 представлена модель ячейки, построенная для расчета температурного поля экспериментальной ячейки ампульного устройства с исследуемым образцом.

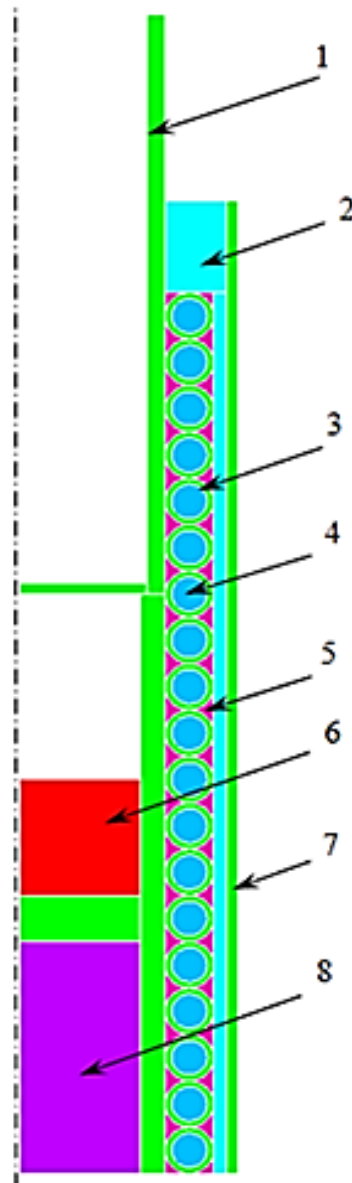


Рисунок 2.13. Расчетная модель экспериментальной ячейки ампульного устройства: 1 – корпус ампулы; 2 – тракт охлаждения; 3 – оболочка нагревателя; 4 – минеральная изоляция нагревателя; 5 – азот; 6 – исследуемый образец; 7 – кожух охлаждения; 8 – теплоизоляция

Между поверхностью кожуха ампулы и окружающим воздухом теплообмен осуществляется за счет свободной конвекции. При задании граничных условий расчета в данном случае коэффициент теплоотдачи принят равным $5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$, а температура окружающего воздуха 20 °C .

На рисунке 2.14 приведено стационарное расчетное температурное поле модели экспериментальной ячейки с образцом лития. Температурное поле модели рассчитано для различных расходов азота в системе охлаждения ампульного устройства при уровне мощности реактора 1 МВ. Температура на рисунке указана в градусах Цельсия.

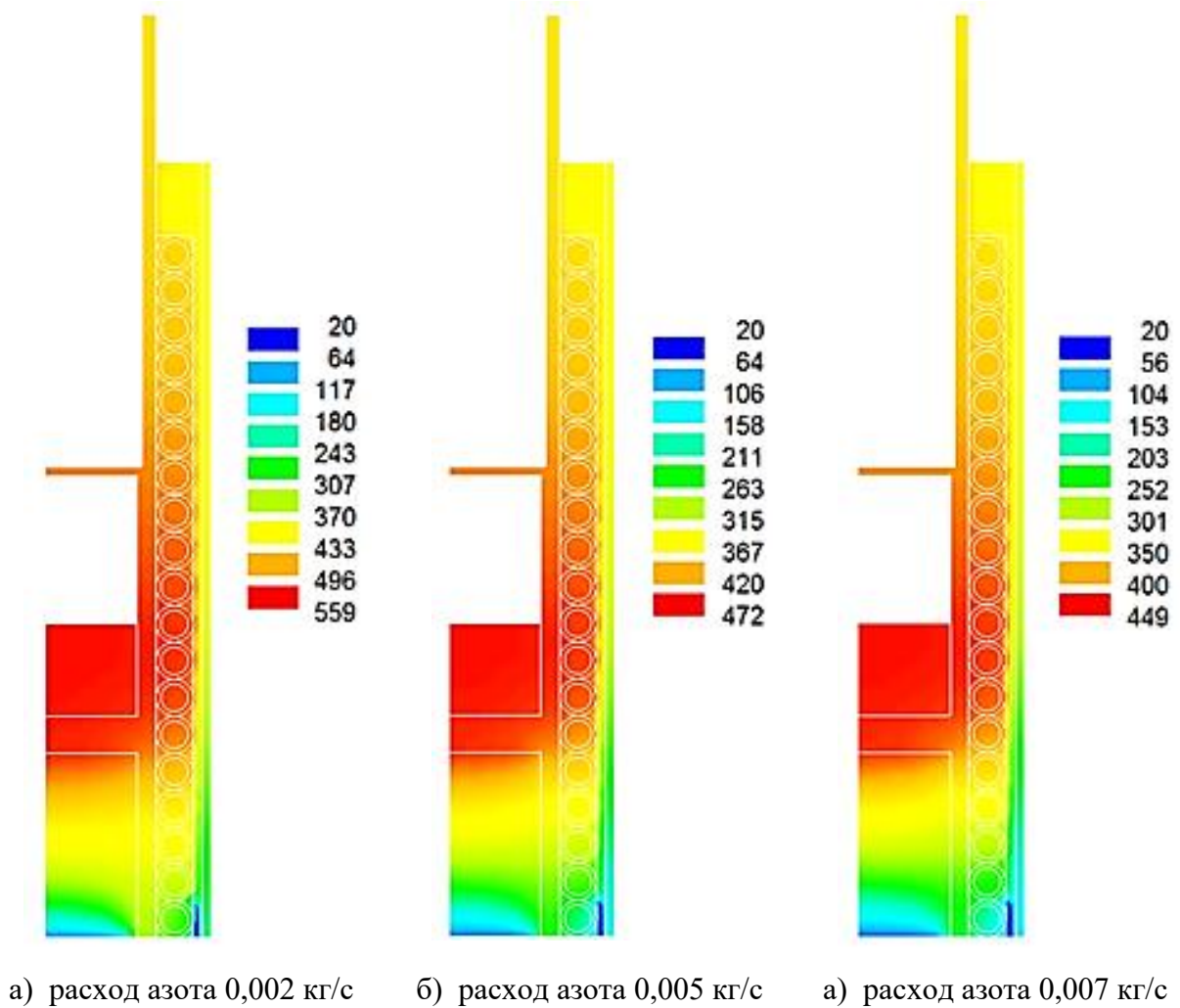


Рисунок 2.14. Температурное поле модели ячейки ампульного устройства с образцом лития при различных расходах азота, в системе охлаждения и уровне мощности реактора ИВГ.1М. – 1 МВт

В ходе расчета установлено, что область максимального значения температуры в ампульном устройстве при облучении находится в центре верхней поверхности исследуемого образца лития. На рис. 2.15 приведен график изменения температуры в центре поверхности образца лития при

облучении на уровне мощности реактора 3 и 6 МВт и при расходе азота в системе охлаждения ампульного устройства равном 0,01 кг/с.

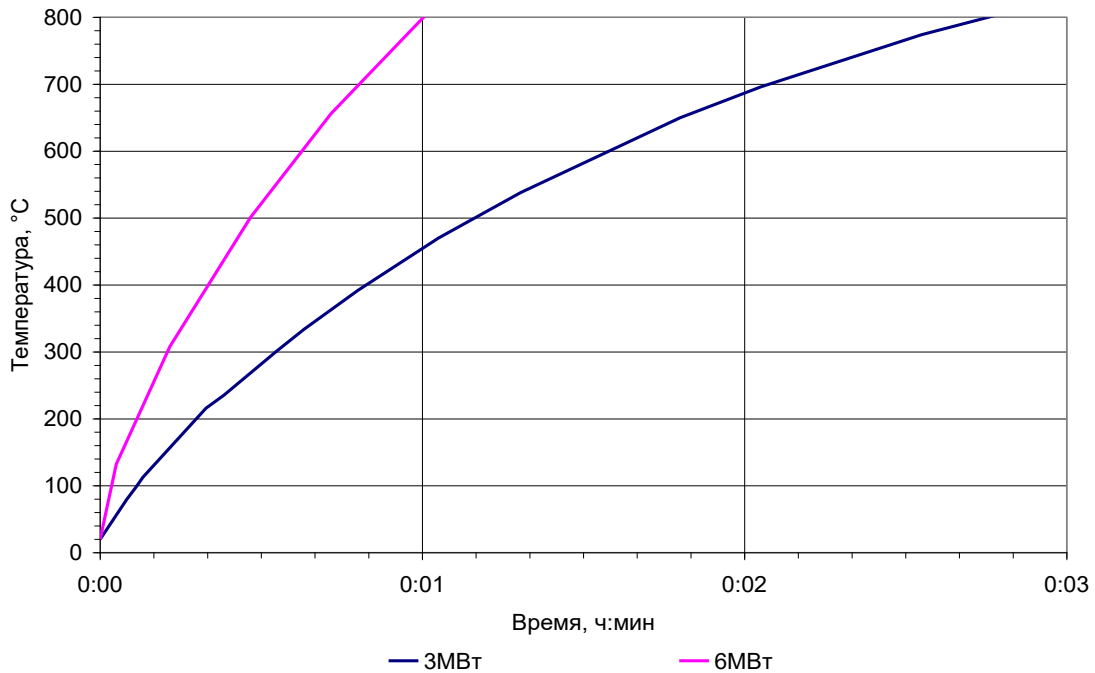


Рисунок 2.15. Зависимость изменения температуры в центре поверхности образца лития в ячейки ампульного устройства от времени, при различных уровнях мощности реактора при расходе азота в системе охлаждения, равном 0,01 кг/с

В результате проведенных теплофизических расчетов были определены температурные режимы и расходы азота, в системе охлаждения ампульного устройства, для проведения реакторных экспериментов по исследованию взаимодействия водорода и его изотопов с образцами жидкого лития при различных уровнях стационарной мощности реактора ИВГ.1М.

2.3 Методики проведения реакторных экспериментов

С целью проведения экспериментов по исследованию процессов взаимодействия жидкого лития с изотопами водорода в условиях нейтронного облучения было проведено расчетное обоснование методик.

Был проведен анализ двух типов экспериментов – абсорбционных экспериментов и экспериментов по генерации и выделению трития.

Адиабатические эксперименты. Суть методики абсорбционных

экспериментов заключается в следующем. После того как в ампуле с исследуемым образцом достигнуты все необходимые (заданные программой проведения эксперимента) условия, в камеру напускается известное количество газа, после чего следует насыщение образца из газовой фазы при выбранной температуре. На всем протяжении эксперимента ведется непрерывная регистрация изменения давления газа в ампуле.

В расчетном блоке по оценке возможностей проведения абсорбционных экспериментов анализировались следующие параметры эксперимента: $S_{эф}$ – эффективная площадь взаимодействия газа с материалом, m^2 ; P – давление газа, Па; t – время эксперимента, с; K – константа взаимодействия изотопов водорода с исследуемым материалом, моль/($m^2 \cdot c \cdot Pa$). Объем ампулы не варьировался, а был принят минимальным для конструкций ампулы типа ИНЕШ, т.е. был ограничен размерами цилиндра с диаметром 50 мм и высотой около 300 мм.

Суть и алгоритм расчета заключались в следующем, задавался ожидаемый параметр – константа взаимодействия изотопов водорода с исследуемым материалом, относительно которого определялись набор параметров эксперимента, такие как давление газа, эффективная площадь взаимодействия газа с материалом и время эксперимента, причем учитывалось, что эксперименты должны были соответствовать следующим требованиям:

- проведение одной серии измерений для одной исследуемой температуры образца не должно превышать 30 минут;
- скорость изменения давления должна быть более 0,01 Па/с;
- время достижения равновесной концентрации газа в образце в эксперименте по насыщению должно быть более 10 часов.

Варьирование эффективной поверхности взаимодействия ограничивалась размерами ФКЭ (физического канала экспериментального) реактора ИВГ.1М и конструктивными особенностями ампульных устройств. Давление газа оценивалось с точки зрения чувствительности системы

измерения давления на экспериментальном стенде ЛИАНА (в настоящий момент система датчиков давления на стенде позволяет регистрировать давление газа в диапазоне от 10^{-1} до 10^5 Па (с точностью около 1 %) и прогнозируемыми значениями растворимости газа в материале.

Алгоритм такой оценки был следующий: для выбранного значения константы взаимодействия изотопов водорода с исследуемым материалом: определялось значение выражения $(S_{эф} \cdot t \cdot (dP/dt))/P = K \cdot R \cdot T/V$, которое принималось за константу эксперимента, относительно которой велись дальнейшие расчеты. А именно осуществлялась прогонка по всем варьируемым параметрам эксперимента: давлению, эффективной площади, времени эксперимента, откуда выбирались средние параметры, заданные требованиями эксперимента.

После определения параметров эксперимента, расчеты проводились для следующего значения константы взаимодействия изотопов водорода с исследуемым материалом. Полученные оценки параметров эксперимента приведены в таблице 2.6

Таблица 2.6 – Параметры абсорбционных экспериментов

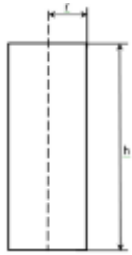
Ожидаемый диапазон значений константы взаимодействия изотопов водорода с литием, моль/(м ² ·с·Па)	Диапазон оптимальных давлений газа, Па	Время эксперимента, с	Эффективная площадь взаимодействия $S_{эф}$, м ²	Скорость изменения давления газа в эксперименте Па/с
от 10^{-10} до 10^{-9}	от $1 \cdot 10^5$ до $1,3 \cdot 10^5$	от 1800 до 2400	10^{-3}	0,005
от 10^{-9} до 10^{-8}	от $2 \cdot 10^4$ до $1,0 \cdot 10^5$	меньше 1800	10^{-3}	0,010
от 10^{-8} до 10^{-6}	от $4 \cdot 10^2$ до 10^4	меньше 1500	10^{-2}	0,025

Таким образом, была показана принципиальная возможность применения метода в будущих экспериментах. Были схематично проработаны конструкционные решения реакторных ампул для различных тритийобразующих материалов, в частности для жидких литийсодержащих сред, с требованием создания общей площади поверхности взаимодействия тритийобразующих материалов порядка 10^{-3} м².

Эксперименты по генерации и выделению трития. Суть экспериментов по генерации и выделению трития заключается в измерении потоков трития, выделяющихся в откачиваемую камеру из тритийобразующих материалов в условиях реакторного облучения.

В рамках расчетного обоснования экспериментов по исследованию процессов генерации и выделения трития был проведен анализ скоростей наработки трития для различных цилиндрических конфигураций облучаемой ячейки, содержащей генератор трития. Такой расчет должен был показать, что количество нарабатываемого трития за время эксперимента можно будет уверенно определить существующей масс-спектрометрической системой измерения стенда ЛИАНА. Общий вид активной ячейки с основными варьируемыми размерами и исходные данные для расчетов представлены в таблице. Расчет проводился для модельного материала (лития) с различной концентрацией ядер лития 6 в смеси.

Таблица 2.7 – Исходные данные для расчета

Обозначение параметра	Значение	Общий вид активной ячейки
Радиус ячейки r , мм	10, 15, 20	
Высота ячейки h , мм	50, 75, 100	
Процентное содержание ${}^6\text{Li}$ в смеси ω , %	1, 5, 10, 20, 50, 100	

Шаг сетки разбиения образца на расчетные зоны в каждом случае должен удовлетворять условию

$$1,1 < R(\text{Li}6)_i / R(\text{Li}6)_{i-1} < 0,9. \quad (2.8)$$

Рассматривались две ядерных реакции с участием нейтронов.



Плотность образца принята равной $0,534 \text{ г/см}^3$. В таблице 2.8 представлена весовая доля изотопов в образце для различных вариантов.

Таблица 2.8 – Весовая доля изотопов в образце

Изотоп	Процентное содержание ${}^6\text{Li}$ в образце, %					
	1	5	10	20	50	100
${}^6\text{Li}$	0,00858565	0,04317498	0,0869748	0,17650407	0,46159572	1
${}^7\text{Li}$	0,99141435	0,95682502	0,9130252	0,82349592	0,53840428	0

Для задания радиальной сетки разбиения образца на расчетные зоны были вычислена средняя длина свободного пробега нейтрона в образце в зависимости от обогащения и с учетом того, что сечение для ${}^6\text{Li}$ составляет 945 барн, для ${}^7\text{Li}$ – 0,0033 барна. В таблице 2.9 представлены величина сечения (σ) и соответствующая средняя длина пробега нейтрона (λ) для разного обогащения.

Таблица 2.9. Сечения и средняя длина свободного пробега нейтрона

Параметр	Процентное содержание ${}^6\text{Li}$ в образце, %					
	1	5	10	20	50	100
Сечение σ , барн	9,483	47,281	94,529	189,026	472,516	945,000
λ , см	2,297	0,458	0,228	0,112	0,043	0,020

Нейтронно-физические расчеты были проведены с помощью программы MCNP5, относящейся к числу универсальных программ для решения задач переноса излучения в произвольной трехмерной геометрии с библиотеками констант ENDF/B –5,6.

Графики распределения скорости реакции по высоте и радиусу активной ячейки для различных значений содержания ${}^6\text{Li}$ показаны на рисунках – 2.23. В таблицах – 2.15 представлены численные значения результатов расчета.

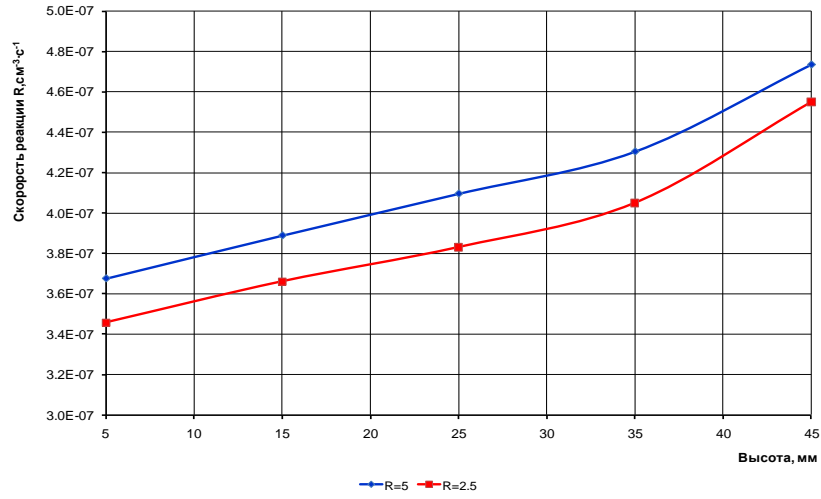


Рисунок 2.16. Распределение скорости реакции по высоте активной ячейки
(содержание ⁶Li – 1 %)

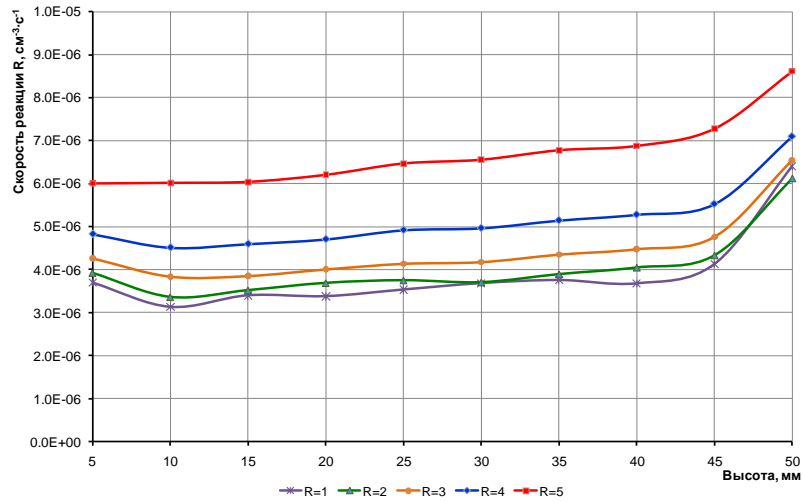


Рисунок 2.17. Распределение скорости реакции по высоте активной ячейки
(содержание ⁶Li – 5 %)

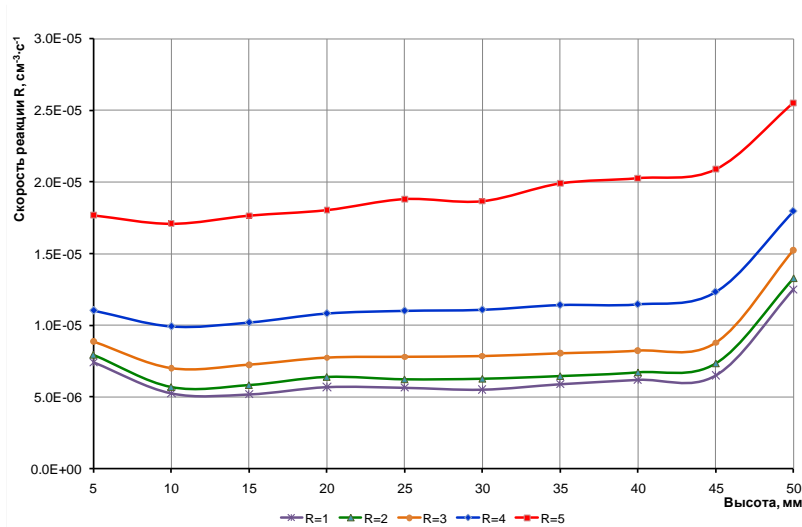


Рисунок 2.18. Распределение скорости реакции по высоте активной ячейки
(содержание ⁶Li – 5 %)

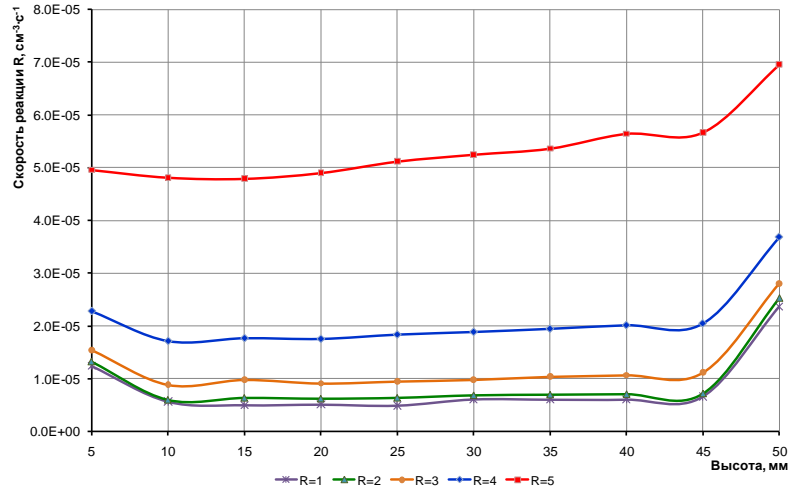


Рисунок 2.19. Распределение скорости реакции по высоте активной ячейки
(содержание ${}^6\text{Li}$ – 20 %)

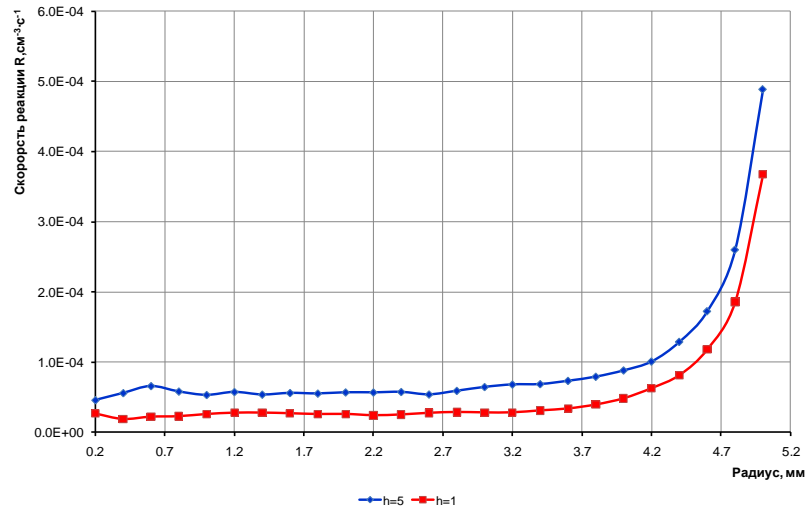


Рисунок 2.20. Распределение скорости реакции по радиусу активной ячейки
(содержание ${}^6\text{Li}$ – 50 %)

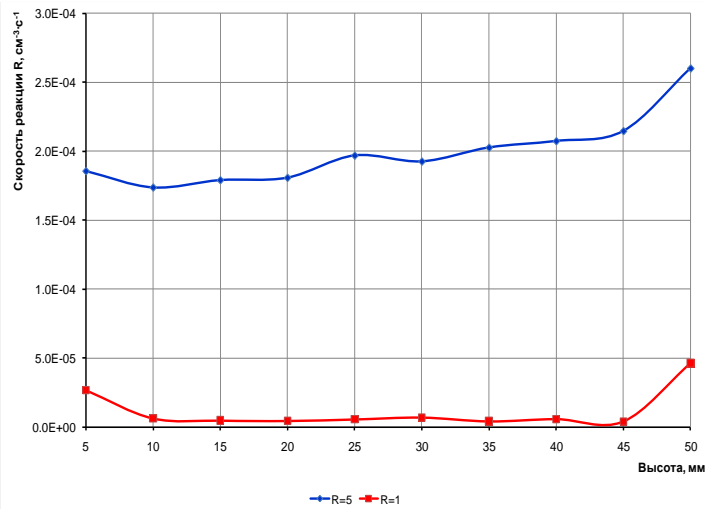


Рисунок 2.21. Распределение скорости реакции по высоте активной ячейки
(содержание ${}^6\text{Li}$ – 50%)

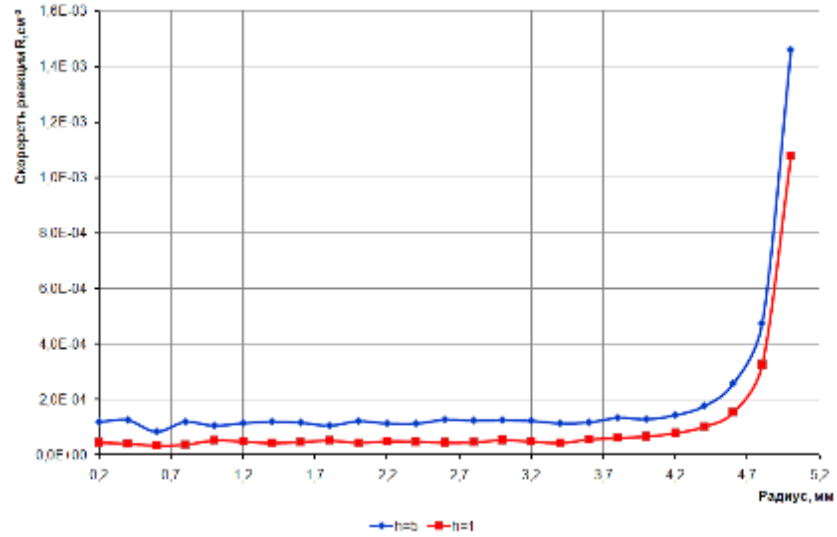


Рисунок 2.22. Распределение скорости реакции по радиусу активной ячейки (содержание ${}^6\text{Li}$ – 100%)

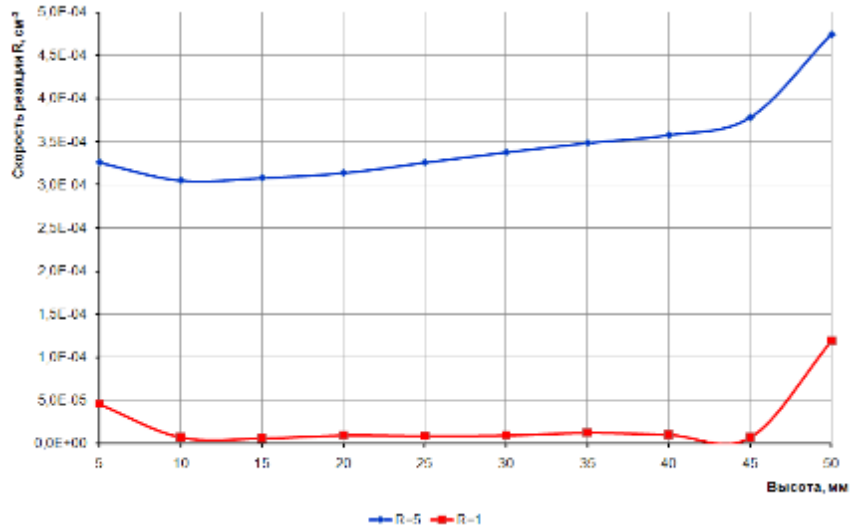


Рисунок 2.23. Распределение скорости реакции по высоте активной ячейки (содержание ${}^6\text{Li}$ – 100 %)

Таблица 2.10 – Скорость реакции ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ (содержание ${}^6\text{Li}$ – 1 %)

Высота, мм	Скорости реакции ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$	
	R=2,5	R=5
45	$4,55 \cdot 10^{-7}$	$4,74 \cdot 10^{-7}$
35	$4,05 \cdot 10^{-7}$	$4,30 \cdot 10^{-7}$
25	$3,83 \cdot 10^{-7}$	$4,10 \cdot 10^{-7}$
15	$3,66 \cdot 10^{-7}$	$3,89 \cdot 10^{-7}$
5	$3,46 \cdot 10^{-7}$	$3,68 \cdot 10^{-7}$

Таблица 2.11 – Скорость реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ (содержание ${}^6\text{Li}$ – 5%)

Высота, мм	Скорости реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$				
	R=1	R=2	R=3	R=4	R=5
50	$6,40 \cdot 10^{-6}$	$6,13 \cdot 10^{-6}$	$6,54 \cdot 10^{-6}$	$7,10 \cdot 10^{-6}$	$8,62 \cdot 10^{-6}$
45	$4,13 \cdot 10^{-6}$	$4,33 \cdot 10^{-6}$	$4,76 \cdot 10^{-6}$	$5,53 \cdot 10^{-6}$	$7,28 \cdot 10^{-6}$
40	$3,67 \cdot 10^{-6}$	$4,05 \cdot 10^{-6}$	$4,47 \cdot 10^{-6}$	$5,28 \cdot 10^{-6}$	$6,88 \cdot 10^{-6}$
35	$3,75 \cdot 10^{-6}$	$3,89 \cdot 10^{-6}$	$4,35 \cdot 10^{-6}$	$5,15 \cdot 10^{-6}$	$6,78 \cdot 10^{-6}$
30	$3,68 \cdot 10^{-6}$	$3,70 \cdot 10^{-6}$	$4,17 \cdot 10^{-6}$	$4,97 \cdot 10^{-6}$	$6,56 \cdot 10^{-6}$
25	$3,53 \cdot 10^{-6}$	$3,75 \cdot 10^{-6}$	$4,13 \cdot 10^{-6}$	$4,92 \cdot 10^{-6}$	$6,47 \cdot 10^{-6}$
20	$3,38 \cdot 10^{-6}$	$3,69 \cdot 10^{-6}$	$4,00 \cdot 10^{-6}$	$4,71 \cdot 10^{-6}$	$6,20 \cdot 10^{-6}$
15	$3,40 \cdot 10^{-6}$	$3,52 \cdot 10^{-6}$	$3,85 \cdot 10^{-6}$	$4,60 \cdot 10^{-6}$	$6,04 \cdot 10^{-6}$
10	$3,13 \cdot 10^{-6}$	$3,36 \cdot 10^{-6}$	$3,84 \cdot 10^{-6}$	$4,51 \cdot 10^{-6}$	$6,02 \cdot 10^{-6}$
5	$3,69 \cdot 10^{-6}$	$3,92 \cdot 10^{-6}$	$4,26 \cdot 10^{-6}$	$4,83 \cdot 10^{-6}$	$6,00 \cdot 10^{-6}$

Таблица 2.12 – Скорость реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ (содержание ${}^6\text{Li}$ – 10 %)

Высота, мм	Скорости реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$				
	R=1	R=2	R=3	R=4	R=5
50	$1,25 \cdot 10^{-5}$	$1,33 \cdot 10^{-5}$	$1,52 \cdot 10^{-5}$	$1,79 \cdot 10^{-5}$	$2,55 \cdot 10^{-5}$
45	$6,51 \cdot 10^{-6}$	$7,33 \cdot 10^{-6}$	$8,78 \cdot 10^{-6}$	$1,23 \cdot 10^{-5}$	$2,09 \cdot 10^{-5}$
40	$6,20 \cdot 10^{-6}$	$6,70 \cdot 10^{-6}$	$8,22 \cdot 10^{-6}$	$1,15 \cdot 10^{-5}$	$2,03 \cdot 10^{-5}$
35	$5,89 \cdot 10^{-6}$	$6,44 \cdot 10^{-6}$	$8,04 \cdot 10^{-6}$	$1,14 \cdot 10^{-5}$	$1,99 \cdot 10^{-5}$
30	$5,52 \cdot 10^{-6}$	$6,25 \cdot 10^{-6}$	$7,84 \cdot 10^{-6}$	$1,11 \cdot 10^{-5}$	$1,87 \cdot 10^{-5}$
25	$5,65 \cdot 10^{-6}$	$6,21 \cdot 10^{-6}$	$7,79 \cdot 10^{-6}$	$1,10 \cdot 10^{-5}$	$1,88 \cdot 10^{-5}$
20	$5,69 \cdot 10^{-6}$	$6,38 \cdot 10^{-6}$	$7,74 \cdot 10^{-6}$	$1,08 \cdot 10^{-5}$	$1,80 \cdot 10^{-5}$
15	$5,18 \cdot 10^{-6}$	$5,81 \cdot 10^{-6}$	$7,25 \cdot 10^{-6}$	$1,02 \cdot 10^{-5}$	$1,77 \cdot 10^{-5}$

Продолжение таблицы 2.12

10	$5,26 \cdot 10^{-6}$	$5,68 \cdot 10^{-6}$	$7,01 \cdot 10^{-6}$	$9,93 \cdot 10^{-6}$	$1,71 \cdot 10^{-5}$
5	$7,43 \cdot 10^{-6}$	$7,93 \cdot 10^{-6}$	$8,86 \cdot 10^{-6}$	$1,10 \cdot 10^{-5}$	$1,77 \cdot 10^{-5}$

Таблица 2.13 – Скорость реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ (содержание ${}^6\text{Li}$ – 20%)

Высота, мм	Скорости реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$				
	R=1	R=2	R=3	R=4	R=5
50	$2,37 \cdot 10^{-5}$	$2,53 \cdot 10^{-5}$	$2,81 \cdot 10^{-5}$	$3,68 \cdot 10^{-5}$	$6,96 \cdot 10^{-5}$
45	$6,63 \cdot 10^{-6}$	$7,22 \cdot 10^{-6}$	$1,12 \cdot 10^{-5}$	$2,04 \cdot 10^{-5}$	$5,67 \cdot 10^{-5}$
40	$6,03 \cdot 10^{-6}$	$7,11 \cdot 10^{-6}$	$1,07 \cdot 10^{-5}$	$2,01 \cdot 10^{-5}$	$5,65 \cdot 10^{-5}$
35	$6,02 \cdot 10^{-6}$	$7,01 \cdot 10^{-6}$	$1,04 \cdot 10^{-5}$	$1,94 \cdot 10^{-5}$	$5,37 \cdot 10^{-5}$
30	$6,07 \cdot 10^{-6}$	$6,89 \cdot 10^{-6}$	$9,80 \cdot 10^{-6}$	$1,88 \cdot 10^{-5}$	$5,25 \cdot 10^{-5}$
25	$4,90 \cdot 10^{-6}$	$6,41 \cdot 10^{-6}$	$9,49 \cdot 10^{-6}$	$1,83 \cdot 10^{-5}$	$5,12 \cdot 10^{-5}$
20	$5,09 \cdot 10^{-6}$	$6,25 \cdot 10^{-6}$	$9,12 \cdot 10^{-6}$	$1,75 \cdot 10^{-5}$	$4,90 \cdot 10^{-5}$
15	$4,97 \cdot 10^{-6}$	$6,40 \cdot 10^{-6}$	$9,80 \cdot 10^{-6}$	$1,76 \cdot 10^{-5}$	$4,79 \cdot 10^{-5}$
10	$5,65 \cdot 10^{-6}$	$6,03 \cdot 10^{-6}$	$8,86 \cdot 10^{-6}$	$1,71 \cdot 10^{-5}$	$4,82 \cdot 10^{-5}$
5	$1,24 \cdot 10^{-5}$	$1,33 \cdot 10^{-5}$	$1,55 \cdot 10^{-5}$	$2,28 \cdot 10^{-5}$	$4,96 \cdot 10^{-5}$

Результаты расчетов показывают, что с увеличением содержания ${}^6\text{Li}$ в образцах скорость реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ при облучении в реакторе ИВГ.1М существенно меняется. Наблюдается неравномерность распределения значений скорости реакции, как по высоте, так и по радиусу образца. Для всех значений содержания ${}^6\text{Li}$, кроме содержания 1 %, скорость реакции во внутренних слоях образца быстро снижается.

Полученные расчеты были использованы в дальнейшем для планирования экспериментов с различными тритий образующими материалами: в частности, они помогли определить оптимальные размеры

экспериментальной ячейки, в зависимости от концентрации лития 6 в исследуемых материалах.

Таблица 2.14 – Скорость реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ (содержание ${}^6\text{Li}$ – 50%)

Радиус, мм	Скорости реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$	
	h=5 мм	h=50 мм
0,2	$2,66 \cdot 10^{-5}$	$4,62 \cdot 10^{-5}$
0,4	$1,88 \cdot 10^{-5}$	$5,62 \cdot 10^{-5}$
0,6	$2,21 \cdot 10^{-5}$	$6,62 \cdot 10^{-5}$
0,8	$2,28 \cdot 10^{-5}$	$5,85 \cdot 10^{-5}$
1,0	$2,58 \cdot 10^{-5}$	$5,36 \cdot 10^{-5}$
1,2	$2,78 \cdot 10^{-5}$	$5,78 \cdot 10^{-5}$
1,4	$2,79 \cdot 10^{-5}$	$5,41 \cdot 10^{-5}$
1,6	$2,70 \cdot 10^{-5}$	$5,64 \cdot 10^{-5}$
1,8	$2,59 \cdot 10^{-5}$	$5,56 \cdot 10^{-5}$
2,0	$2,60 \cdot 10^{-5}$	$5,73 \cdot 10^{-5}$
2,2	$2,42 \cdot 10^{-5}$	$5,72 \cdot 10^{-5}$
2,4	$2,53 \cdot 10^{-5}$	$5,78 \cdot 10^{-5}$
2,6	$2,76 \cdot 10^{-5}$	$5,43 \cdot 10^{-5}$
2,8	$2,88 \cdot 10^{-5}$	$5,95 \cdot 10^{-5}$
3,0	$2,82 \cdot 10^{-5}$	$6,49 \cdot 10^{-5}$
3,2	$2,83 \cdot 10^{-5}$	$6,85 \cdot 10^{-5}$
3,4	$3,11 \cdot 10^{-5}$	$6,90 \cdot 10^{-5}$
3,6	$3,38 \cdot 10^{-5}$	$7,37 \cdot 10^{-5}$
3,8	$3,95 \cdot 10^{-5}$	$7,96 \cdot 10^{-5}$
4,0	$4,84 \cdot 10^{-5}$	$8,85 \cdot 10^{-5}$
4,2	$6,29 \cdot 10^{-5}$	$1,01 \cdot 10^{-4}$
4,4	$8,15 \cdot 10^{-5}$	$1,29 \cdot 10^{-4}$
4,6	$1,18 \cdot 10^{-4}$	$1,73 \cdot 10^{-4}$
4,8	$1,86 \cdot 10^{-4}$	$2,60 \cdot 10^{-4}$
5,0	$3,67 \cdot 10^{-4}$	$4,89 \cdot 10^{-4}$

Таблица 2.15 – Скорости реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ (содержание ${}^6\text{Li}$ – 100%)

Радиус, мм	Скорости реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$	
	h=5 мм	h=50 мм
0,2	$4,62 \cdot 10^{-5}$	$1,19 \cdot 10^{-4}$
0,4	$4,16 \cdot 10^{-5}$	$1,26 \cdot 10^{-4}$
0,6	$3,52 \cdot 10^{-5}$	$8,42 \cdot 10^{-5}$
0,8	$3,82 \cdot 10^{-5}$	$1,20 \cdot 10^{-4}$
1,0	$5,35 \cdot 10^{-5}$	$1,06 \cdot 10^{-4}$
1,2	$4,96 \cdot 10^{-5}$	$1,15 \cdot 10^{-4}$
1,4	$4,39 \cdot 10^{-5}$	$1,20 \cdot 10^{-4}$
1,6	$4,80 \cdot 10^{-5}$	$1,17 \cdot 10^{-4}$
1,8	$5,30 \cdot 10^{-5}$	$1,06 \cdot 10^{-4}$
2,0	$4,52 \cdot 10^{-5}$	$1,22 \cdot 10^{-4}$
2,2	$5,01 \cdot 10^{-5}$	$1,14 \cdot 10^{-4}$
2,4	$4,91 \cdot 10^{-5}$	$1,13 \cdot 10^{-4}$
2,6	$4,53 \cdot 10^{-5}$	$1,27 \cdot 10^{-4}$
2,8	$4,67 \cdot 10^{-5}$	$1,24 \cdot 10^{-4}$
3,0	$5,47 \cdot 10^{-5}$	$1,26 \cdot 10^{-4}$
3,2	$4,96 \cdot 10^{-5}$	$1,23 \cdot 10^{-4}$
3,4	$4,41 \cdot 10^{-5}$	$1,14 \cdot 10^{-4}$
3,6	$5,72 \cdot 10^{-5}$	$1,18 \cdot 10^{-4}$
3,8	$6,22 \cdot 10^{-5}$	$1,34 \cdot 10^{-4}$
4,0	$6,78 \cdot 10^{-5}$	$1,29 \cdot 10^{-4}$
4,2	$7,99 \cdot 10^{-5}$	$1,44 \cdot 10^{-4}$
4,4	$1,03 \cdot 10^{-4}$	$1,77 \cdot 10^{-4}$
4,6	$1,55 \cdot 10^{-4}$	$2,58 \cdot 10^{-4}$
4,8	$3,26 \cdot 10^{-4}$	$4,74 \cdot 10^{-4}$
5,0	$1,08 \cdot 10^{-3}$	$1,46 \cdot 10^{-3}$

После анализа проведенных расчетов были определены задачи по оптимизации исследований влияния нейтронного облучения на сорбционные

характеристики литья и выполнена отработка методики проведения реакторных экспериментов.

Одной из задач оптимизации исследований было определение временного интервала проведения экспериментов, так чтоб за один реакторный пуск на выбранной в соответствии с программой пуска мощности провести эксперименты при температурах литья 200; 250; 300; 350 °С, при различных давлениях подаваемого в ампулу водорода (для определения оптимальных режимов подачи газа в экспериментальное устройство). Для реализации всех температурных режимов проводимых исследований одной из немаловажных задач также являлась отработка режимов охлаждения ампулы. Еще одной из задач было определение влияния предварительного отжига образца при 500 °С на скорость поглощения водорода литием.

Для решения вышеописанных задач были проведены серия методических экспериментов по сорбции изотопов водорода образцом лития. Полученные зависимости одной из проведенных серий экспериментов представлены на рисунке 2.24.

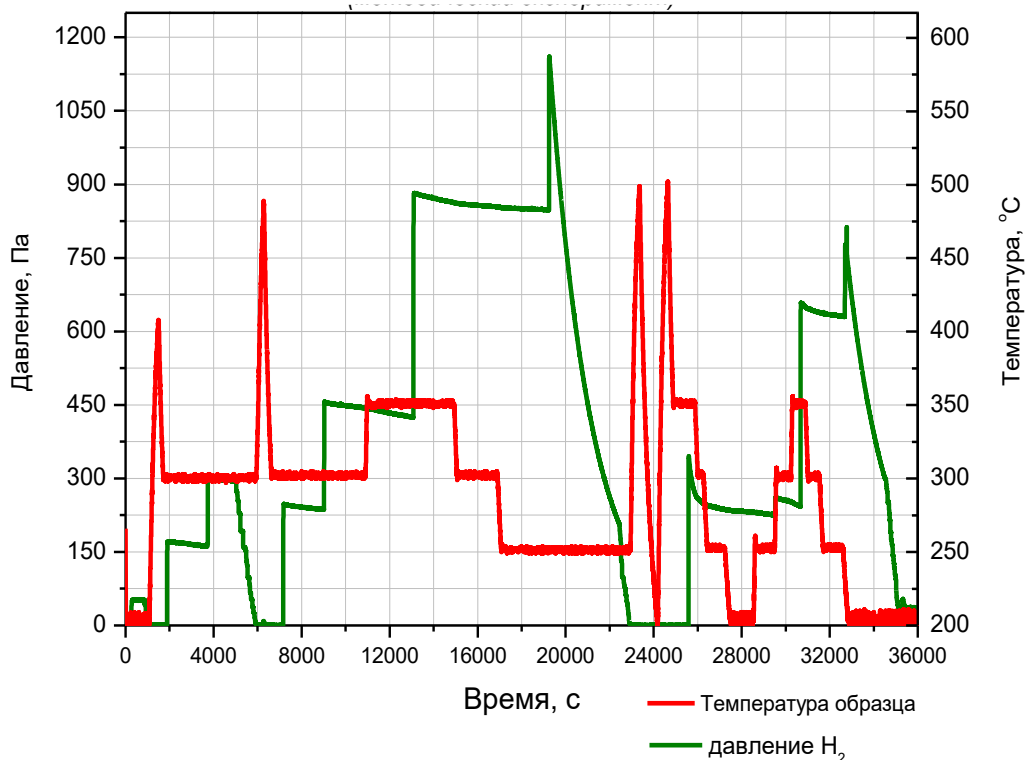


Рисунок 2.24. Зависимость давления водорода в АУ от температуры литья

На данном рисунке приведены графики температуры образца жидкого лития и давления водорода, подаваемого в ампульное устройство во время проведения методических экспериментов. На приведенных графиках видно, что в ходе проведения данных экспериментов использовались различные сценарии: а в частности проведена серия экспериментов с предварительным нагревом образца на 500 °С и без такого нагрева; проведена серия в которой в первом случае после снятия сорбционной кривой на каждой температурной полке начиная с 200 °С температура образца повышалась на 50 °С, во втором случае наоборот после снятия сорбционной кривой на каждой температурной полке начиная с 350 °С температура образца понижалась на 50 °С.

По данным, полученным в проведенных методических экспериментах, способом сравнения скоростей поглощения водорода литием (для образца с предварительным отжигом и без него), была выполнена оценка степени влияния предварительной подготовки поверхности образца на скорость абсорбции водорода литием. В результате выполненной оценки была определена температура предварительного отжига, обеспечивающая более эффективную очистку поверхности образца лития, которая составила 500 °С. Были определены необходимые методические процедуры подготовки образца к проведению реакторных экспериментов, такие, как температурный режим и вакуумные условия.

В проведенных методических экспериментах были оценены: оптимальная величина давлений подаваемых в ампулу водорода от 133 Па до 500 Па и время насыщения образца литиевой КПС от 5 мин до 10 мин, в интервале исследуемых температур от 200 °С до 350 °С. С целью получения параметров скоростей реакции взаимодействия изотопов водорода с образцом жидкого лития в течении одного реакторного пуска был выбран оптимальный временной режим (диаграмма) проведения экспериментов с учетом того, что максимальная длительность одного реакторного пуска на ИВГ.1М составляет не более 4 часов.

Отработаны режимы охлаждения ампульной ячейки с литием во всех исследуемых температурных интервалах. Проработаны различные варианты подачи (расход) газообразного азота в систему охлаждения экспериментального устройства в температурном интервале от 20 °С до 500 °С. Таким образом, были определены все основные методические условия проведения реакторных сорбционных экспериментов с литием.

С целью отработки методики проведения реакторных экспериментов по генерации и выделению трития из жидкого лития был проведен методический облучательный эксперимент. Основной задачей эксперимента была проверка возможности достижения исследуемых температур для предложенного варианта экспериментальных ампул, определялись режимы охлаждения ампулы на различных мощностях реактора, была испытана система измерения потоков газа (на базе квадрупольного масс – спектрометра) из исследуемого образца.

Условия проведения экспериментов:

- температура образца – 200; 300 °С;
- остаточное давление в измерительном тракте – 10^{-4} Па;
- тепловая мощность ИВГ1.М – 1; 2 и 6 МВт.

Полная диаграмма реакторного эксперимента по газовыделению трития и гелия из образца лития приведена на рисунке 2.25. На данном рисунке представлены графики изменения мощности реактора, температур образца и кинетики выделения водорода (H_2), гелия (He) и трития (T_2) из образца лития.

Первоначальный пик гелия и трития связан сростом общего фона масс – спектрометра за счет первичной радиационной дегазации ампулы, и не отражает реальных потоков газа. Начиная с 6 МВт мощности реактора можно наблюдать повторное увеличение потоков гелия и трития в систему, это связано с двумя факторами: повышением температуры лития; а также достижением предельной равновесной концентрации газов в литии (за счет наработки в результате реакторного облучения).

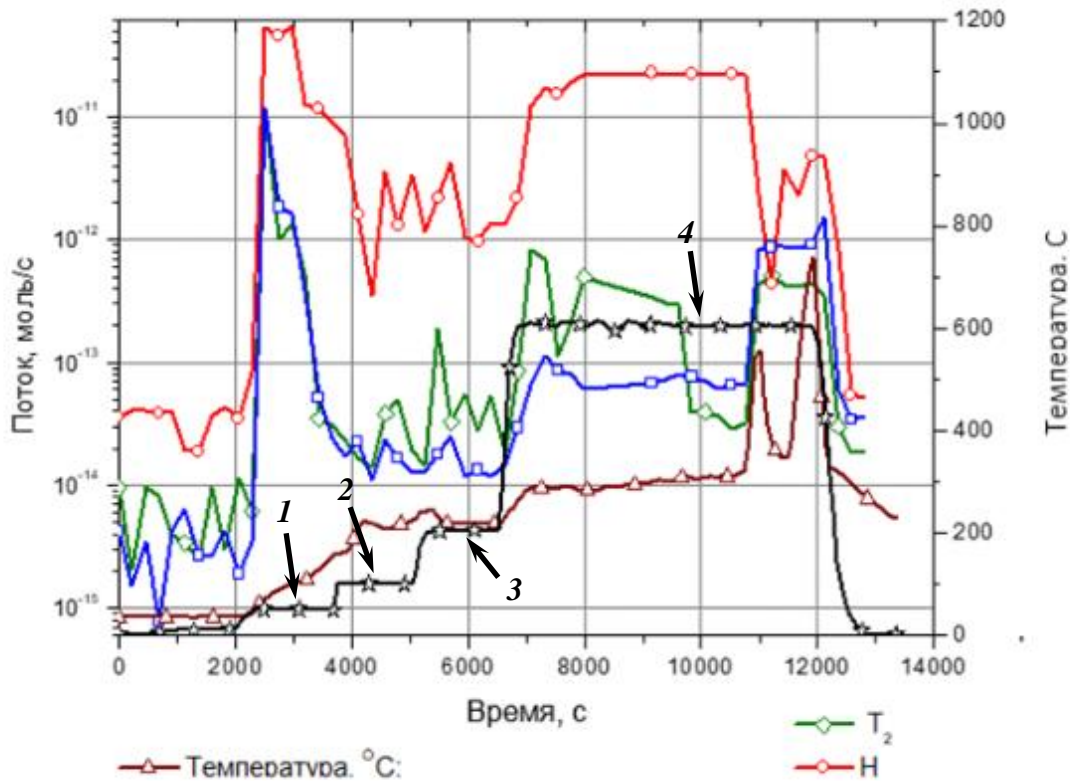


Рисунок 2.25. Зависимость потоков трития и водорода из жидкого лития от температуры на мощности реактора: 1 – 0,5 МВт; 2 – 1 МВт; 3 – 2 МВт; 4 – 6 МВт

К основным результатам методического реакторного эксперимента с литием следуют отнести следующее:

- предложенная конструкция реакторного ампульного устройства позволяет выполнять эксперименты в диапазоне исследуемых температур образца от 200 °C до 700 °C;

- были определены оптимальные расходы азота в системе охлаждения для различных мощностей реактора;

- система измерения трития и гелия (на базе квадрупольного масс – спектрометра) позволяет регистрировать потоки газа из образца на уровне от 10^{-13} моль/с до 10^{-10} моль/с;

- как показал эксперимент во время реакторного пуска, возникают обусловленные облучением различного рода наводки на электронные схемы масс – спектрометра расположенного непосредственно в реакторном зале

(системы питания, управления, усиления сигнала), которые приводят к шуму на уровне сигнала, соответствующего потокам 10^{-14} моль/с;

– определенные потоки гелия из образца оказались сравнимы по порядку величины с расчетными значениями; потоки трития оказались заметно меньше; что, по всей видимости, вызвано образованием тритида лития в объеме образца;

– эффективное выделение гелия из лития начинается с температур около $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ и далее остается стабильным в интервале температур от $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Настоящий факт, возможно, объясняется достижением предельной равновесной концентрации гелия в литии, после которой идет постоянное образование пузырьков и выделение газа.

Глава 3. Проведение реакторных экспериментов

После проведения методических экспериментов в соответствии отработанной методикой были проведены эксперименты по исследованию процессов взаимодействия жидкого лития с изотопами водорода в условиях нейтронного облучения.

3.1 Эксперименты по определению параметров сорбции изотопов водорода жидким литием в условиях реакторного облучения

Эксперименты по определению параметров сорбции изотопов водорода жидким литием в условиях реакторного облучения были проведены в два этапа. На первом этапе эксперименты проводились с образцом литиевой КПС, на втором с образцом жидкого лития.

3.1.1 Реакторные эксперименты с литиевой КПС

В соответствии с отработанными в методических экспериментах режимами подачи водорода в ампулу с исследуемым образцом и режимами нагрева и охлаждения литиевой КПС были проведены несколько серий реакторных экспериментов по исследованию сорбционных характеристик литиевых КПС в условиях нейтронного облучения на различных уровнях мощности реактора ИВГ.1М.

После того как в ампуле с образцом литиевой КПС были достигнуты все необходимые и определенные отработанной методикой проведения реакторных экспериментов условия, устанавливалась стационарная температура образца. Далее в камеру напускалось известное количество водорода, после чего следовало насыщение образца из газовой фазы при выбранной температуре. На всем протяжении экспериментов велась непрерывная регистрация изменения давления газа в ампуле.

Далее следовало повторение эксперимента, но уже при другой температуре исследуемой КПС. После проведения одной серии экспериментов, которая заключалась в прохождении исследуемого температурного интервала от 200 °С до 350 °С, скачивался весь содержащийся в камере газ и осуществлялся нагрев образца до 500 °С в течение 300 с. В дальнейшем проводилась следующая серия экспериментов.

Условия проведенных исследований были следующими:

- температура образца литиевой КПС от 200 до 350 °С;
- остаточное давление в измерительном тракте от 10^{-4} до 10^{-6} Па;
- давление подаваемого в АУ водорода от 80 до 400 Па;
- эксперименты проводились при мощности реактора 0,5; 1 и 2 МВт.

На рисунке 3.1 приведены полученные значения давления водорода в камере АУ в зависимости от температуры образца литиевой КПС при проведении реакторных экспериментов на мощности реактора 0.5, 1 и 2 МВт.

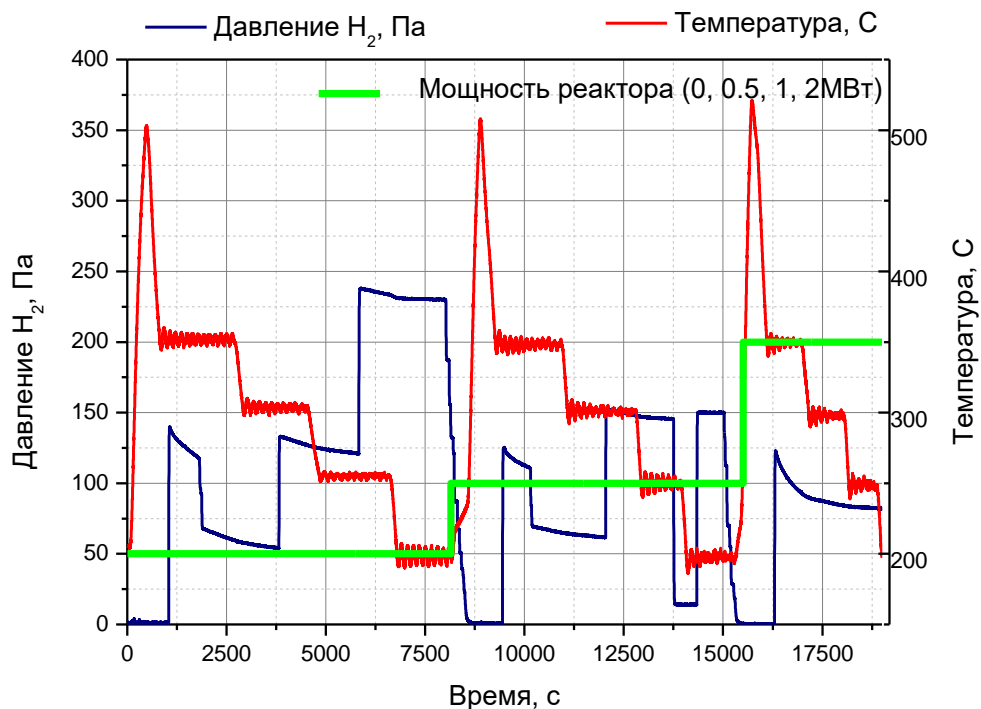


Рисунок 3.1 – Временная зависимость давления водорода в АУ от температуры литиевой КПС на мощностях реактора 500 кВт, 1 и 2 МВт

Каждый эксперимент фактически включал в себя три эксперимента – дореакторный, реакторный и послереакторный.

На рисунках 3.2, приведены графики изменения давления и температуры исследуемого образца в дореакторной и послереакторной серии для одного из реакторных экспериментов.

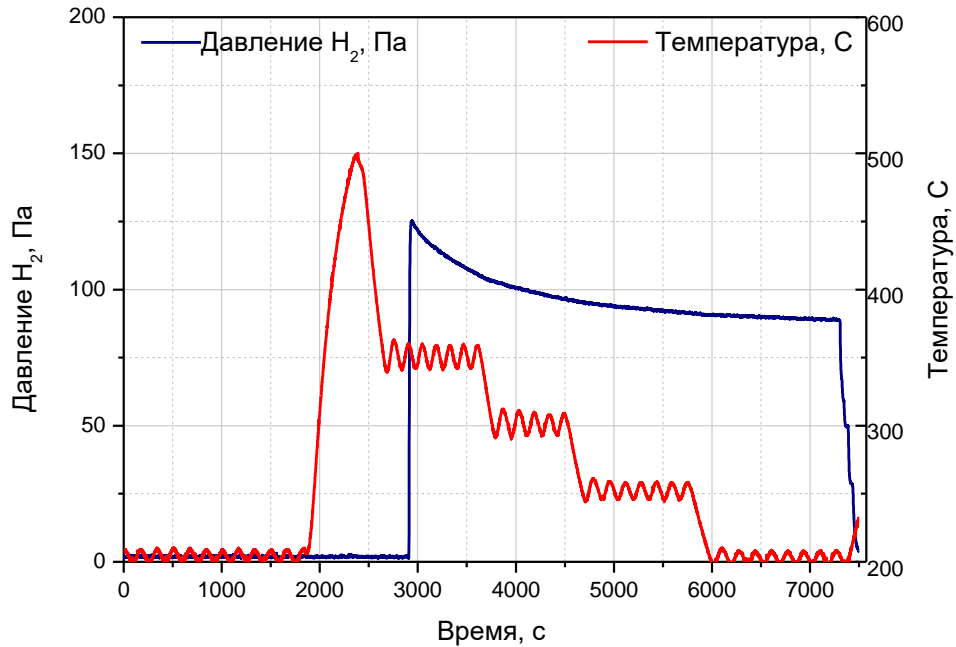


Рисунок 3.2. Временная зависимость давления водорода в АУ от температуры образца зарегистрированные в ходе проведения дореакторного эксперимента

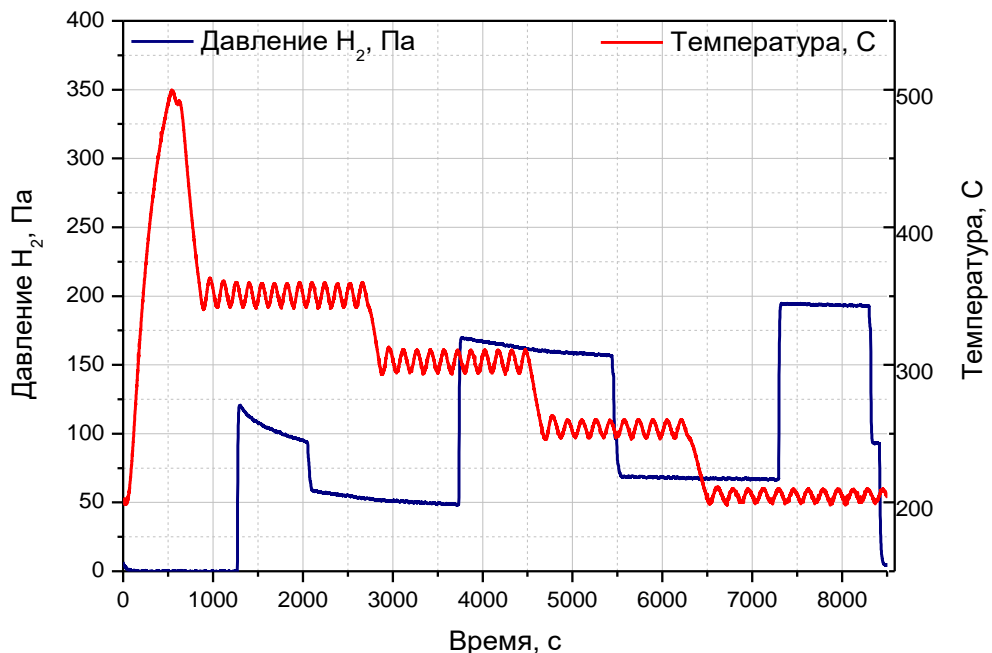


Рисунок 3.3. Временная зависимость давления водорода в АУ от температуры образца зарегистрированные в ходе проведения послереакторного эксперимента

3.1.2 Реакторные эксперименты с жидким литием

Также в соответствии с отработанными в методических экспериментах режимами была проведена серия реакторных экспериментов с образцом жидкого лития методом газовой абсорбции. После того как в ампуле с исследуемым материалом были достигнуты все необходимые (заданные программой проведения эксперимента) условия, устанавливалась стационарная температура образца. Далее в камеру напускалось известное количество газа, после чего следовало насыщение образца из газовой фазы при выбранной температуре. На всем протяжении эксперимента велась непрерывная регистрация изменения давления газа в ампуле. Далее следовало повторение эксперимента, но уже при повышении исследуемой температуры. После проведения одного эксперимента, которая заключается в прохождении исследуемого температурного интервала, скачивался весь содержащийся в камере газ и осуществляется нагрев образца до 500 °С в течение 300 с. В дальнейшем проводился следующий эксперимент. Каждый эксперимент серии проводился в три этапа: вначале проводился дореакторный эксперимент, затем реакторный эксперимент и в заключении послереакторный эксперимент. Время между дореакторным и реакторным экспериментами было минимально возможным.

Условия проведения экспериментов:

- температура образца – 200; 250; 300 и 350 °С
- остаточное давление в измерительном тракте – 10^{-4} Па;
- давление водорода в объеме АУ – от 70 Па до 130 Па
- тепловая мощность ИВГ1.М – 1; 3 и 6 МВт.

На рисунке приведены полученные экспериментальные данные реакторных экспериментов по исследованию газовой абсорбции водорода образцом жидкого лития. На данном рисунке представлены графики изменения мощности реактора, температур образца, давления водорода в ампуле за всё время исследования (а именно, дореакторный, реакторный и

послереакторный цикл измерений).

Для большей наглядности на рисунке 3.5 приведен в увеличенном и более удобном для восприятия виде один из этапов эксперимента – участок А, выделенный синим прямоугольником на рисунке . В частности, на рисунке видно, что угол наклона линеаризованных участков падения давления в ампуле зависят от температуры образца, причем с увеличением температуры лития скорость абсорбции водорода растет, а при фиксированной температуре и различном давлении (на графике это температура 350 °С) скорость абсорбции пропорционально зависит от давления водорода в ампуле.

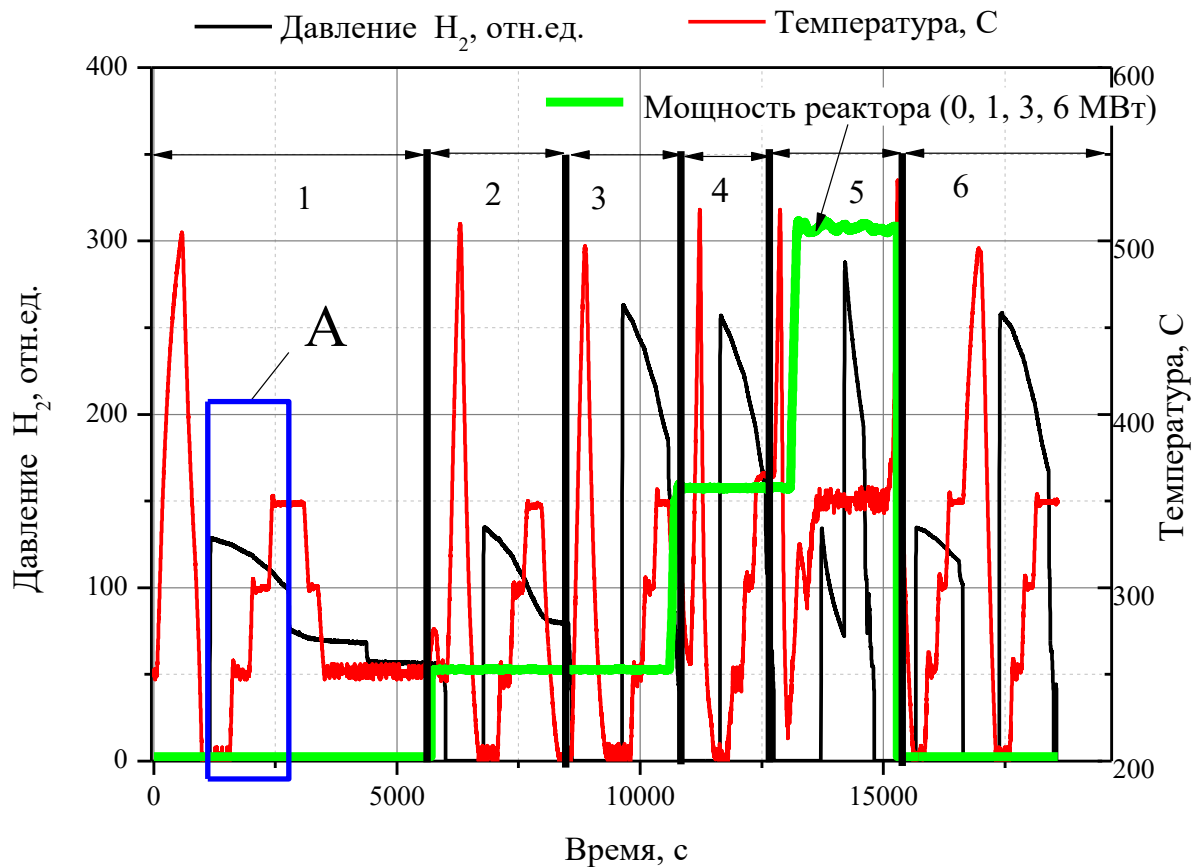


Рисунок 3.4. Зависимость давления водорода в АУ от температуры жидкого лития и нейтронного потока за все время проведения реакторного эксперимента

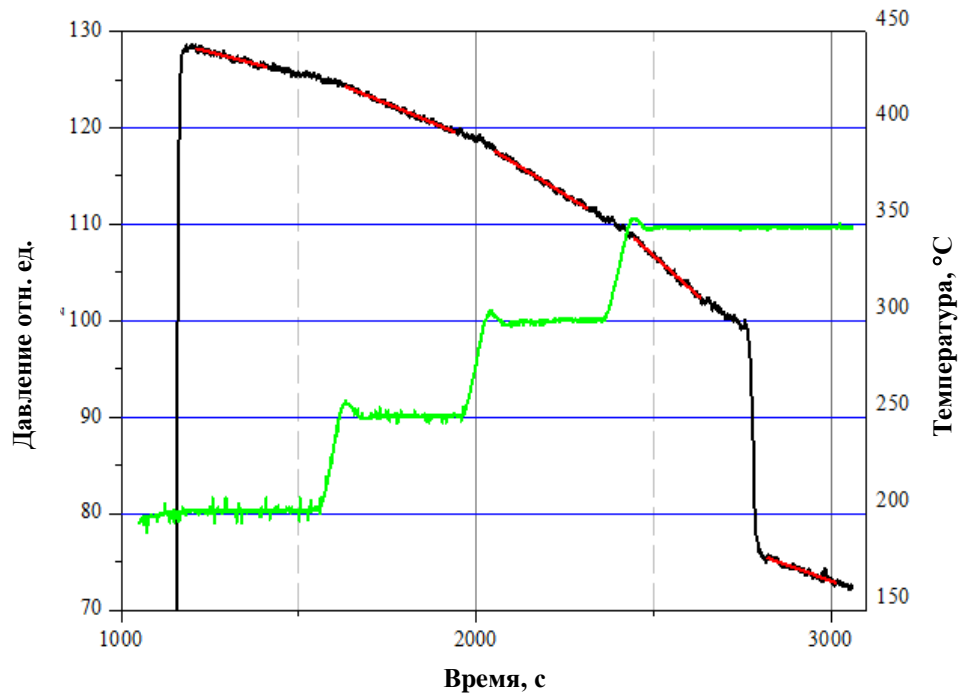


Рисунок 3.5. Зависимость давления водорода в АУ от температуры жидкого лития (увеличенный участок А, рисунок 3.4)

В результате данных экспериментов был качественно зафиксирован эффект влияния реакторного излучения на скорость взаимодействия водорода с жидким литием. Данный эффект заключался в увеличении скорости взаимодействия в условиях реакторного излучения (см. рис. 3.6 и 3.7).

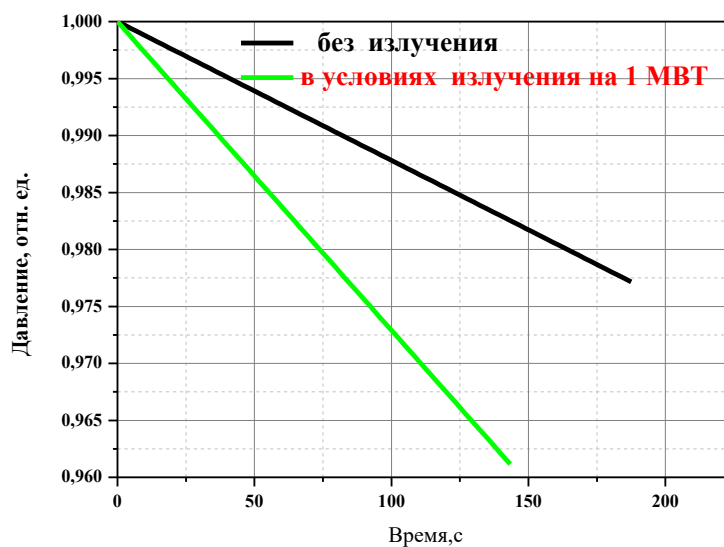


Рисунок 3.6. Изменение давления водорода в экспериментальном устройстве при температуре образца 250 °С в зависимости от времени, значения нормированы на единицу (начальное давление водорода в АУ 120 Па)

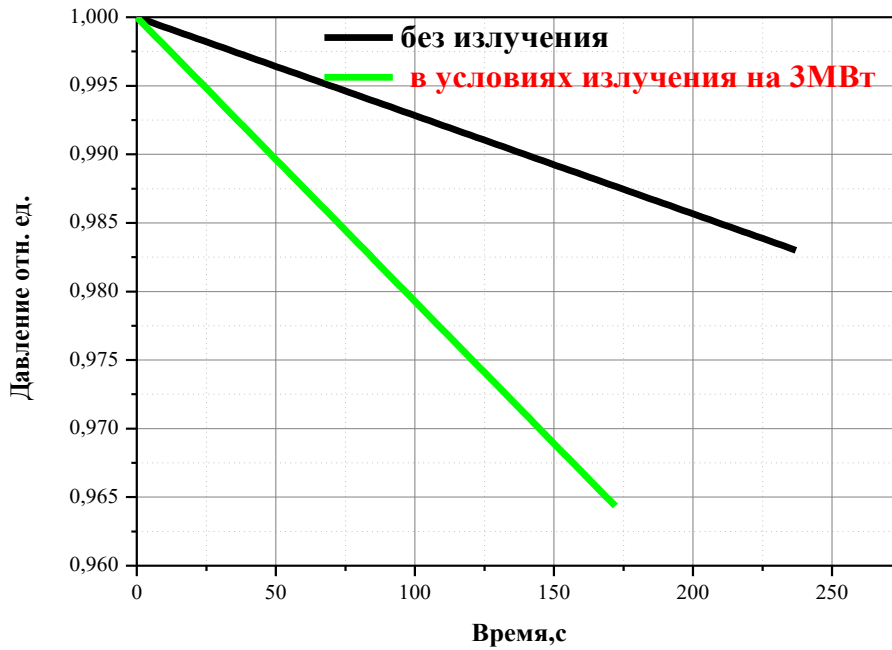


Рисунок 3.7. Изменение давления водорода в экспериментальном устройстве при температуре образца 200 °С в зависимости от времени, значения нормированы на единицу (начальное давление водорода в АУ 130 Па)

Результаты экспериментов показали, что увеличение скорости взаимодействия водорода с жидким литием пропорционально мощности излучения.

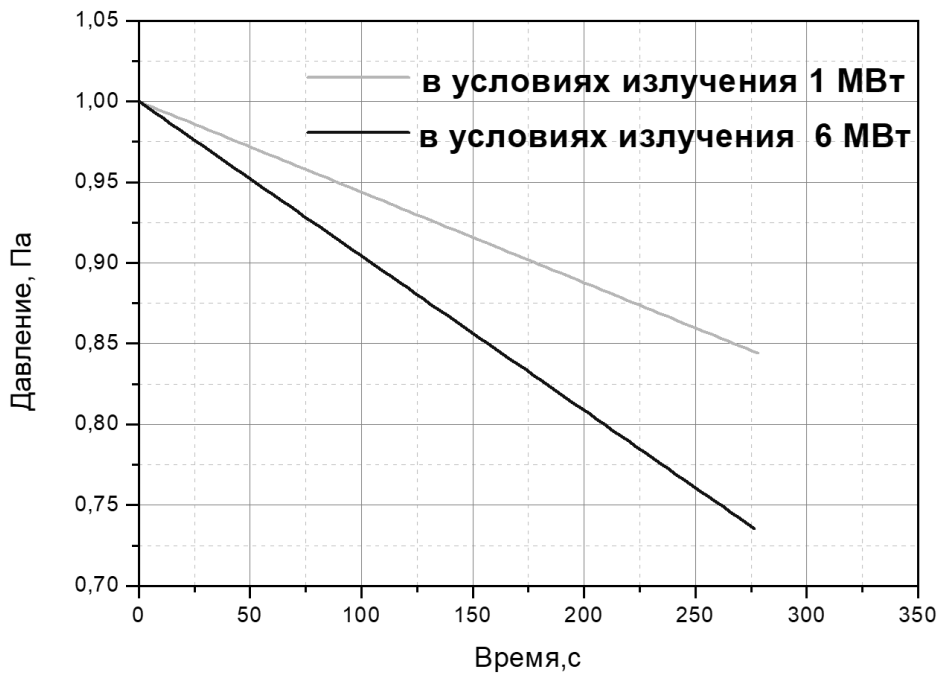


Рисунок 3.8. Изменение давления водорода в экспериментальном устройстве при температуре образца 350 °С при реакторном облучении на 1 и 6 МВт в зависимости от времени, значения нормированы на единицу (начальное давление водорода в АУ 90 Па).

3.2 Эксперименты по исследованию генерации и выделения трития из жидкого лития в условиях реакторного облучения

Для проведения реакторных экспериментов по исследованию процессов наработки и выделения трития и гелия из лития были проведены работы по подготовке образца лития к реакторным экспериментам. Подготовка заключалась в очистке лития от окислов и неметаллических примесей, а также разрушении тонких пленок химических соединений на поверхности лития, образовавшихся в процессе изготовления и монтажа облучательного ампульного устройства.

Очистка образца проводилась методом отжига в следующем порядке:

– вначале образец отжигался при температуре 200 °С в течение 40 мин в условиях непрерывной высоковакуумной откачки и масс–спектрометрической регистрации газовой фазы в объеме ампульного устройства. После этого ячейка с образцом была нагрета до температуры 250 °С и выдержана на данной температурной полке ещё 15 мин;

– затем масс–спектрометрическая регистрация прекращалась (измерительный тракт с помощью вакуумного вентиля отсекался от объема ампульного устройства) и в объем экспериментальной ячейки с образцом лития подавался очищенный гелий давлением 50 кПа, при этом ячейка с образцом подогревалась до температуры 700 °С и выдерживалась приданной температуре в течение 40 мин. Напуск очищенного гелия в объем над образцом при повышении температуры образца был необходим для предотвращения распыления молекул лития на стенки ампульного устройства, т.к. при температуре выше 300 °С, согласно работам [80 и 81], результаты которых приведены на рисунке 3.9, жидкий литий имеет высокую скорость испарения в вакууме.

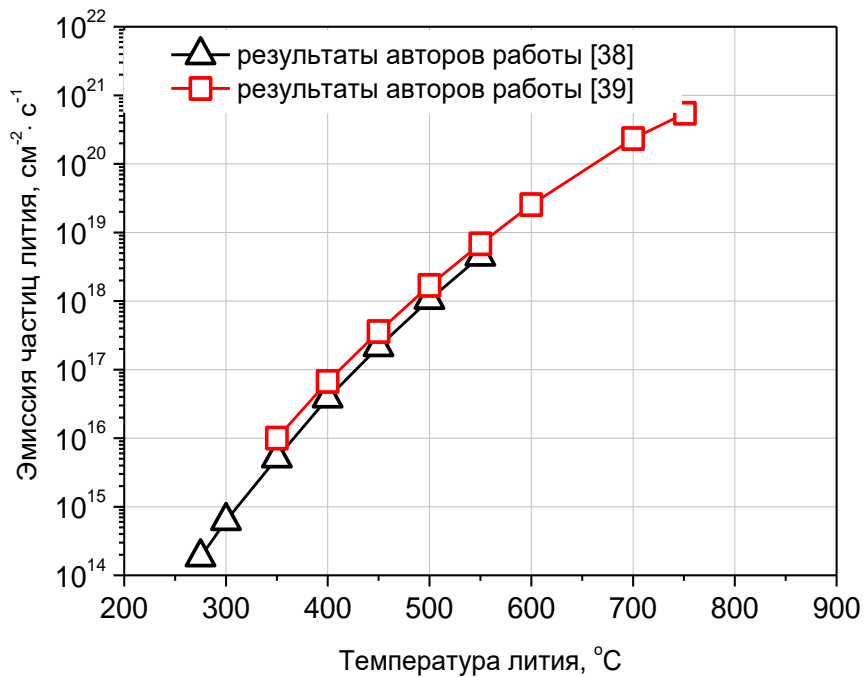


Рисунок 3.9. Температурная зависимость эмиссии лития с жидкой поверхности при обычном вакуумном испарении

Временные зависимости изменения парциальных давлений газов в объеме ампульного устройства в процессе отжига при температуре образца 200 °C и 250 °C представлены на рисунке 3.10.

Из графика, представленного на рисунке 3.10, видно, что в момент плавления лития (температура образца от 190 °C до 200 °C) происходит интенсивное выделение газов (углеводородных соединений) с а.е.м. M25, M26, M27, M28. Данный эффект предположительно можно объяснить тем, что в жидкой фазе литий за счет своей химической активности восстанавливает на поверхности образца оксиды неметаллов (в основном это CO, CO₂, H₂O), после чего восстановленный элемент выделяется с поверхности образца в виде соединений с водородом (C₂H, C₂H₂, C₂H₃, C₂H₄). При дальнейшем повышении температуры лития до 250 °C наблюдается относительно резкое выделение M16 (атомарный кислород) и M44 (двуокись углерода). Данный эффект, вероятнее всего, связан с началом распада на поверхности пероксида лития и соединением освободившегося кислорода с углеродом (образование CO₂).

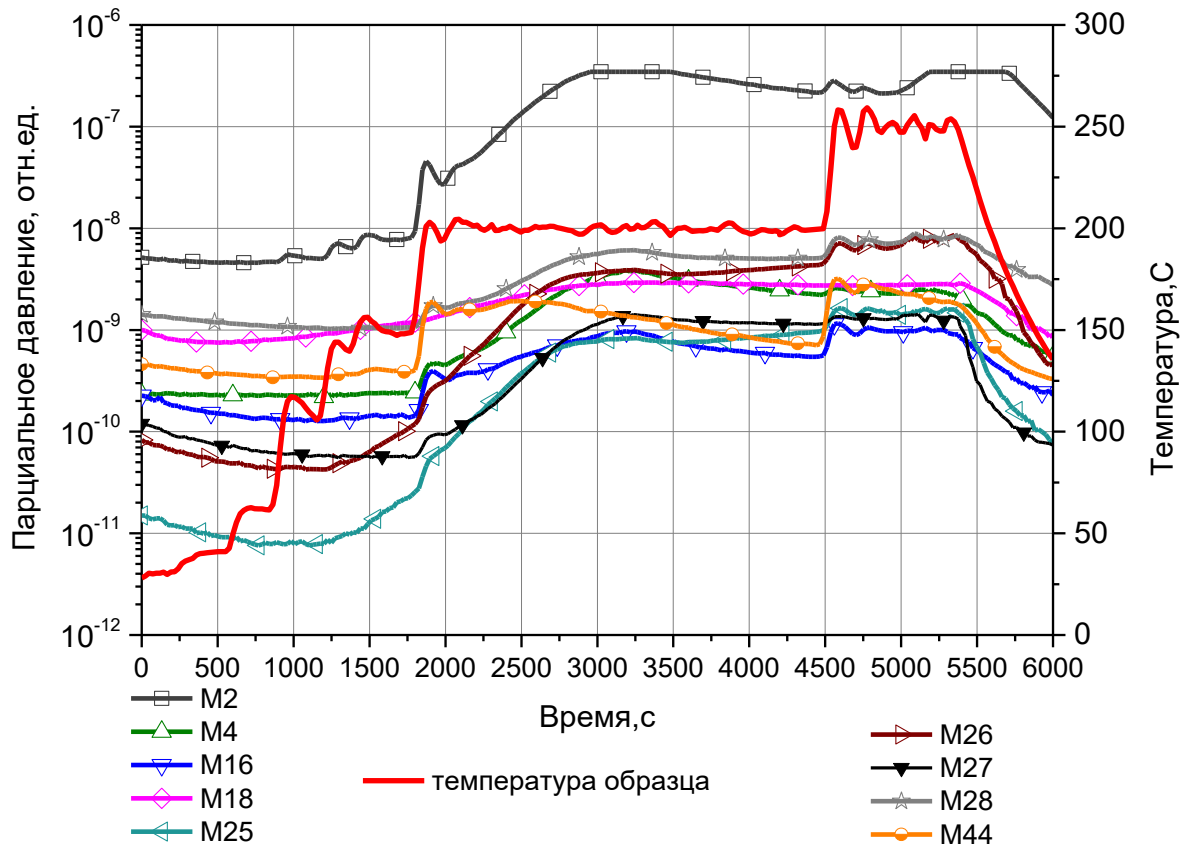


Рисунок 3.10. Изменение значений парциальных давлений остаточных газов, выделяющихся из образца лития в процессе отжига при температурах 200 °С и 250 °С в зависимости от времени

Таким образом, в процессе отжига исследуемого образца лития при температурах 200 °С, 250 °С в условиях непрерывной откачки и высокотемпературного отжига образца при температуре 700 °С в среде гелия, на поверхности жидкого лития происходили процессы, в результате которых велась очистка поверхности жидкого лития от окислов и различных неметаллических примесей.

Для уменьшения сорбционных свойств лития и образования тритида лития при диффузии трития к поверхности образца, в процессе реакторного облучения, перед проведением реакторных экспериментов, исследуемый образец был насыщен дейтерием. Насыщение образца лития дейтерием проводилось при температуре образца 250 °С, 300 °С и 350 °С при различных давлениях дейтерия. На рис. 3.11 представлена временная зависимости изменения парциального давления дейтерия над поверхностью образца лития за все время насыщения. Общее количество поглощенного дейтерия жидким

литием за все время эксперимента составило $1,6 \cdot 10^{-3}$ молей. Из графика (см. рис. 3.11) видно, что с увеличением температуры образца скорость поглощения дейтерия жидким литием увеличивается.

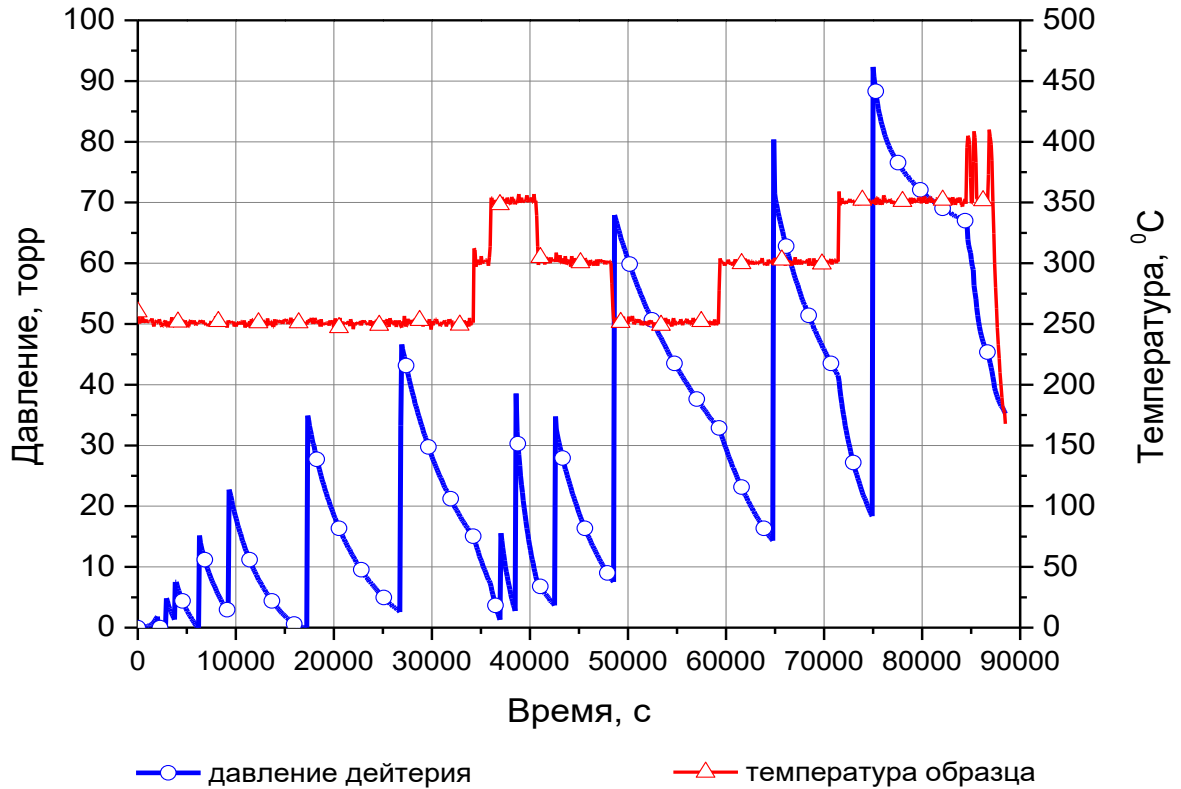


Рисунок 3.11. Изменение давления дейтерия в объеме ампульного устройства в зависимости от температуры образца за время эксперимента

После насыщения образца лития дейтерием был проведен ТДС эксперимент с масс –спектрометрической регистрацией выделяющихся газов из исследуемого образца в интервале температур от 50 °C до 300 °C, с шагом нагрева образца 50 °C. Кинетика выделения газов из образца лития за время проведения ТДС–эксперимента представлена на рисунке 3.12.

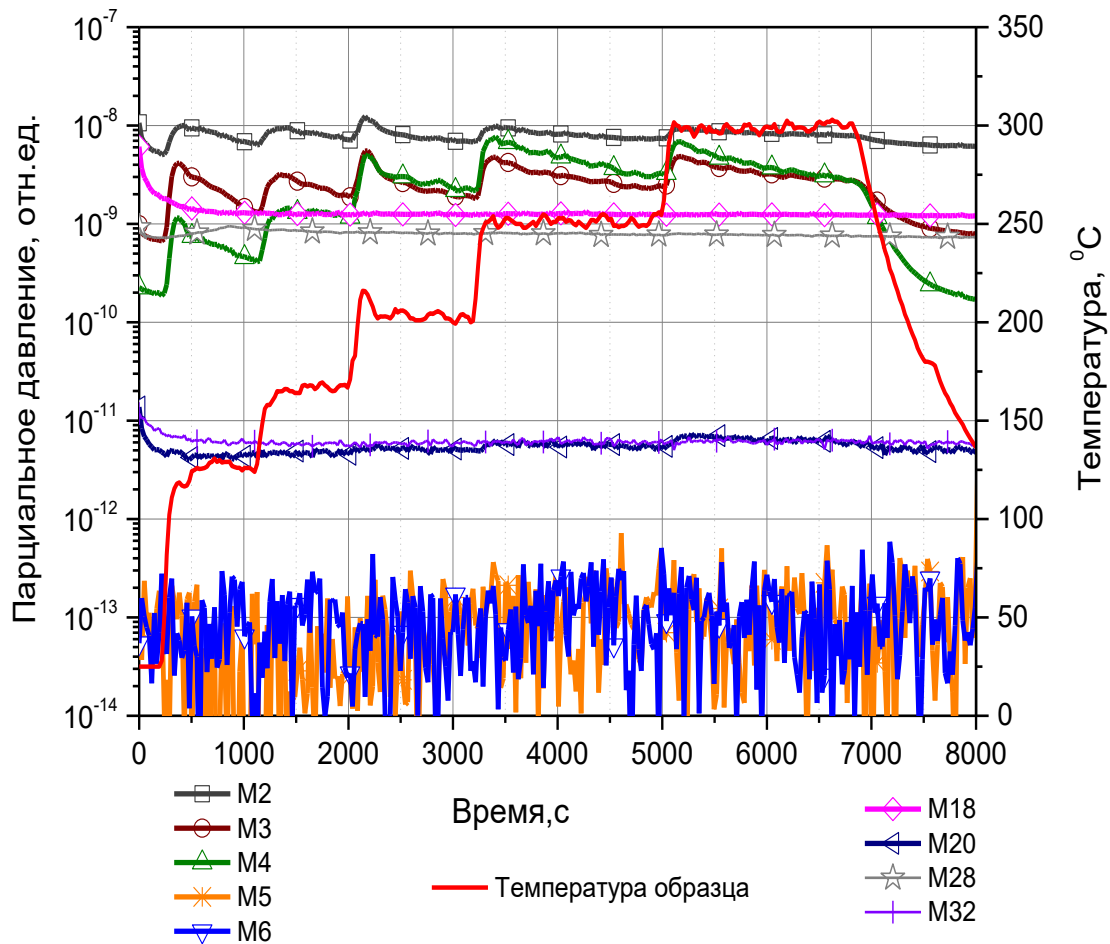


Рисунок 3.12. Изменения парциальных давлений газов в объеме над образцом лития в зависимости от температуры образца за все время ТДС –эксперимента

Результаты ТДС–эксперимента показали, что с повышением температуры образца наблюдаются незначительные изменения парциальных давлений газов с а.е.м. М3 (HD) и М4 (D_2), средний уровень которых за все время нагрева остается примерно одинаковым. Можно предположить, что дейтерий в насыщенном образце находится в виде дейтерида лития и занимает свободные атомы лития, тем самым будет частично исключать возможность образования тритида лития при диффузии трития к поверхности образца в процессе реакторного облучения.

После проведения всех работ по подготовке исследуемого образца лития к реакторным экспериментам на реакторе ИВГ.1М было проведено два эксперимента по исследованию параметров наработки и выделению трития и гелия из образца лития в условиях нейтронного излучения.

Условия проведения экспериментов были следующие:

- остаточное давление в измерительном тракте – 10^{-5} Па;
- диапазон температуры исследуемого образца – от 80 °С до 450 °С;
- мощность реактора ИВГ.1М – 2 МВт и 6 МВт.

Методика проведения реакторных экспериментов заключалась в следующем:

- перед началом выхода реактора на заданный уровень тепловой мощности на образце устанавливалась исследуемая температура и включалась масс –спектрометрическая регистрация парциальных давлений газов в объеме ампульного устройства с образцом при непрерывной откачке высоковакуумным насосом;

- далее реактор выводился на исследуемый уровень мощности, при этом температура образца с помощью системы охлаждения стабилизировалась на заданной температурной полке;

- после того, как потоки выделяющихся трития и гелия выходили на квазистационарный уровень, образец нагревался до следующего уровня заданной температуры;

- после снятия кинетических зависимостей выделения исследуемых газов из образца для всех заданных температур образца реактор ИВГ.1М выводился на следующий заданный уровень тепловой мощности, и проводился новый цикл масс –спектрометрических измерений;

- после снятия кинетических зависимостей выделения исследуемых газов из образца для всех заданных температур образца и мощностей реактора проводился плановый сброс мощности реактора.

На рисунках 3.13 и 3.14 представлены данные, полученные в реакторных экспериментах по исследованию газовыделения гелия и трития из образца жидкого лития при различных температурах и плотностях нейтронного потока.

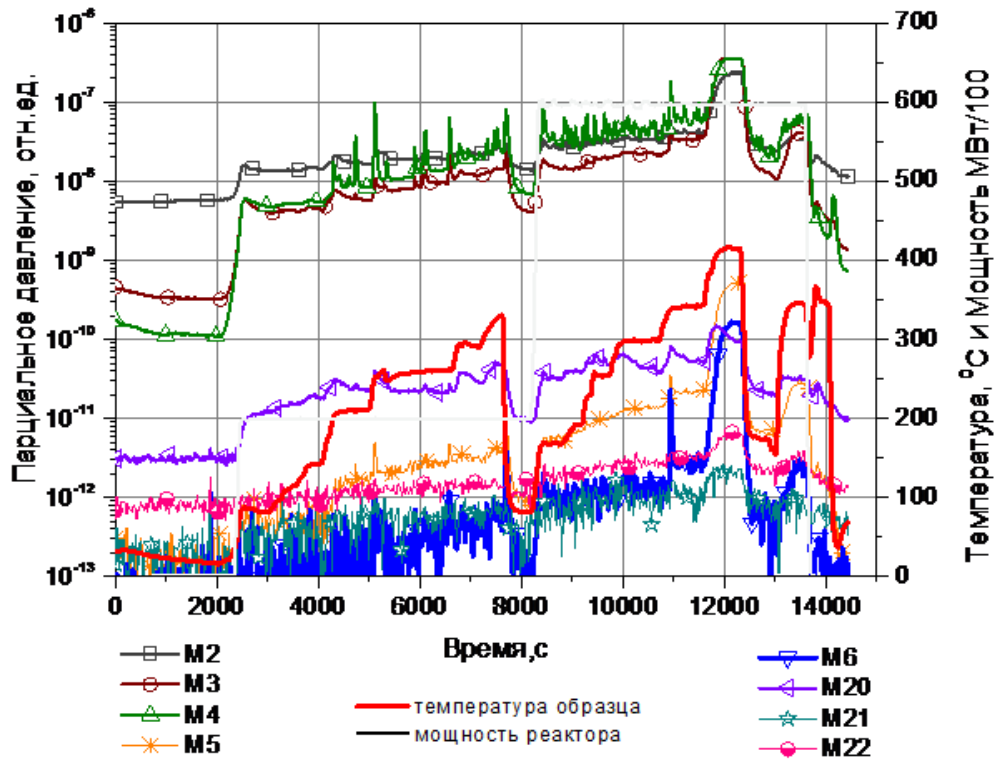


Рисунок 3.13. Временная зависимость парциальных давлений выделяющихся из образца газов от температуры жидкого лития при проведении реакторного эксперимента на мощности 2 и 6 МВт

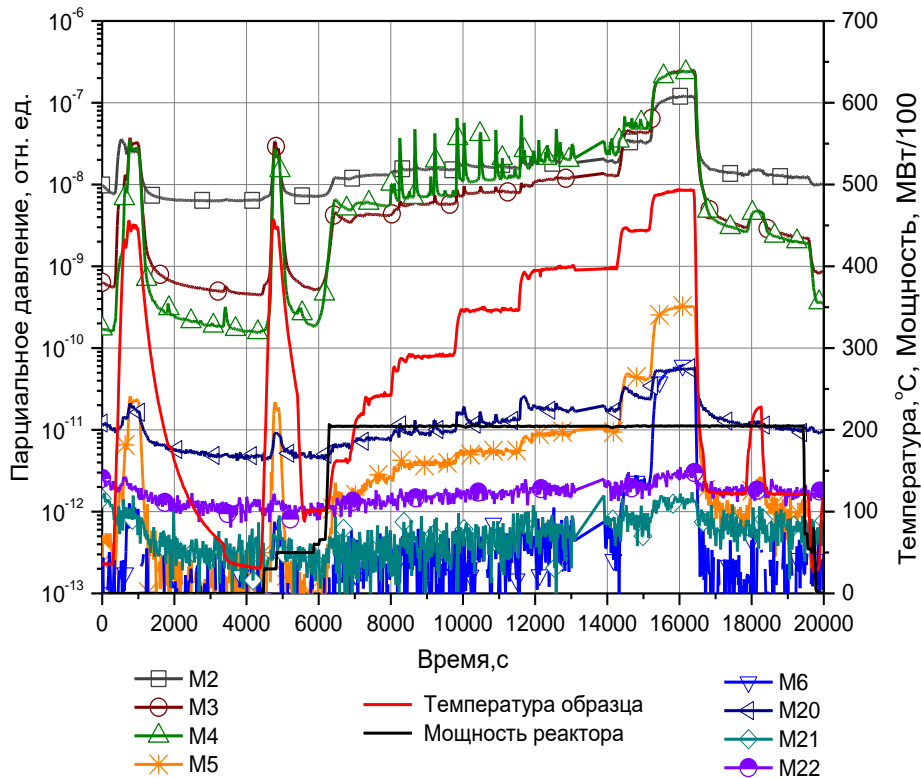


Рисунок 3.14. Временная зависимость парциальных давлений выделяющихся из образца газов от температуры жидкого лития при проведении реакторного эксперимента на мощности 2 МВт

Глава 4. Обработка и анализ полученных результатов

В результате проведенных дореакторных, реакторных и послереакторных экспериментов по исследованию взаимодействия изотопов водорода с жидким литием и определению влияния на это взаимодействие нейтронного излучения и температуры были получены уникальные экспериментальные данные. Полученные данные были систематизированы, обработаны и проанализированы. В данной главе приводится подробный анализ экспериментальных данных.

4.1 Анализ результатов экспериментов по определению параметров сорбции изотопов водорода жидким литием в условиях реакторного облучения

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. Для расчета была использована следующая формула [82]:

$$k = - \frac{dv}{dt} \cdot \frac{1}{S_{эфф} \cdot P(t)} = - \frac{\frac{dP(t)}{dt}}{P(t)} \cdot \frac{V}{R \cdot T \cdot S_{эфф}}, \quad (4.1)$$

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

Расчеты были проведены для всех абсорбционных экспериментов (вне реакторных и реакторных). По результатам расчетов были построены

зависимости константы взаимодействия водорода с жидким литием от температуры и уровня реакторного облучения. Из зависимостей были рассчитаны параметры взаимодействия, такие как скорость взаимодействия водорода с поверхностью лития, предэкспоненты в аррениусовской зависимости константы взаимодействия, энергии активации процесса поглощения водорода, представленные на рисунке 4.1 и в таблице 4.1.

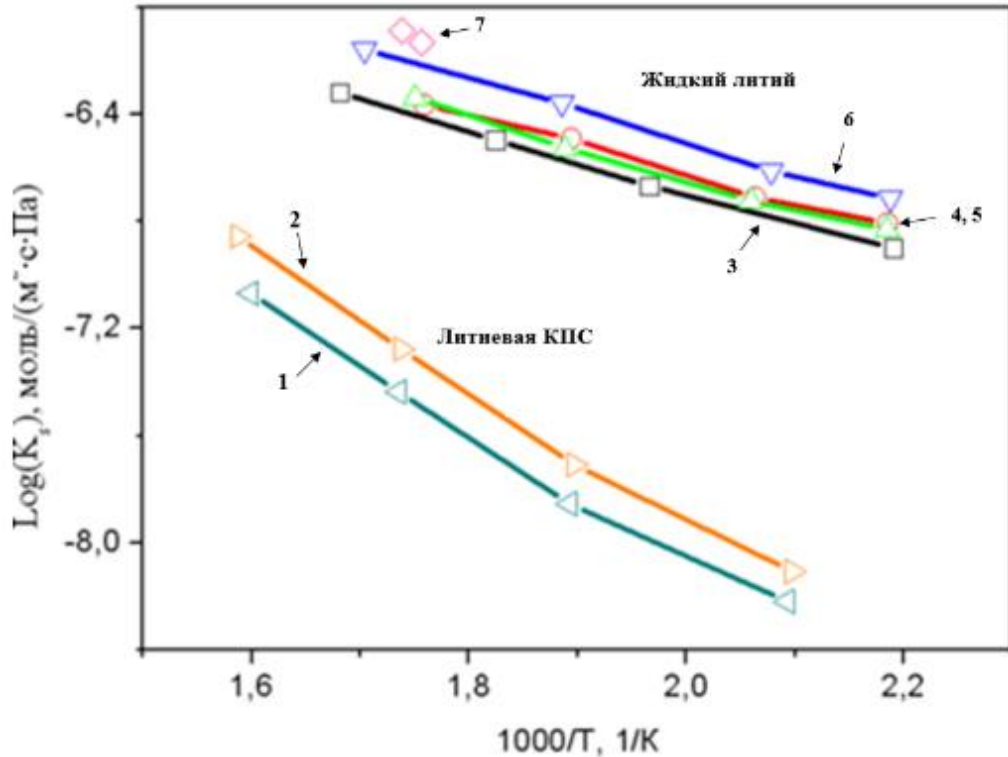


Рисунок 4.1. Зависимость константы взаимодействия водорода с образцами от температуры. *Жидкий литий*: 3 – без облучения; 4, 5 – реакторные эксперименты, 1 МВт; 6 – реакторные эксперименты, 3 МВт; 7 – реакторные эксперименты, 6 МВт. *Литиевая КПС*: 1 – без облучения; 2 – реакторные эксперименты, 2 МВт

Таблица 4.1 – Рассчитанные параметры взаимодействия водорода с жидким литием и литиевой КПС

Эксперимент	K_0 , моль/($m^2 \cdot s \cdot Pa$)	E , кДж/моль
Жидкий литий		
Без облучения	$(5,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-5}$	$22,8 \pm 0,4$
На 1 МВт	$(4,0 \pm 0,7) \cdot 10^{-5}$	$21,6 \pm 0,7$
На 3 МВт	$(3,5 \pm 1,0) \cdot 10^{-5}$	$21,7 \pm 0,5$
На 6 МВт	$(4,5 \pm 1,5) \cdot 10^{-5}$	$20,6 \pm 0,7$
Литиевая КПС		
Без облучения	$(1,3 \pm 0,7) \cdot 10^{-3}$	47 ± 3
На 2 МВт	$(5,4 \pm 3) \cdot 10^{-3}$	44 ± 3

Для выяснения механизма поглощения изотопов водорода литием были рассмотрены процессы, происходящие на поверхности жидкого лития в ходе его насыщения 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 они записываются следующим образом [83]:

$$J = -D \frac{dC}{dx}, \quad (4.2)$$

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{d^2C}{dx^2} \quad (4.3)$$

В представленном случае считается, что в начальное время поглощения изотопов водорода жидким литием выполняются граничные условия первого рода. Есть представление [84] что концентрация водорода (дейтерия) на поверхности лития устанавливается мгновенно и равно равновесной растворимости. Тогда для двухатомного газа:

$$\begin{cases} C_0|_{t \geq 0} = S_H \sqrt{P_0}, x = 0 \\ C_0|_{t \geq 0} = S \sqrt{P_l}, x = l \end{cases}, \quad (4.4)$$

где $S_H = S_0 \exp(-H_S/RT)$ – растворимость, приведенная к единице давления; S_0 – постоянная растворимости; H_S – теплота растворения; R – газовая постоянная; T – температура; P_0 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 [85]:

$$J = \frac{DS_H}{l} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\exp \left(-\frac{D\pi^2 n^2}{l^2} \cdot t \right) \right] \right\}, \quad (4.5)$$

На рис. 4.2 приведены временные изменения потока в образец, рассчитанные для различных коэффициентов диффузии водорода в литии.

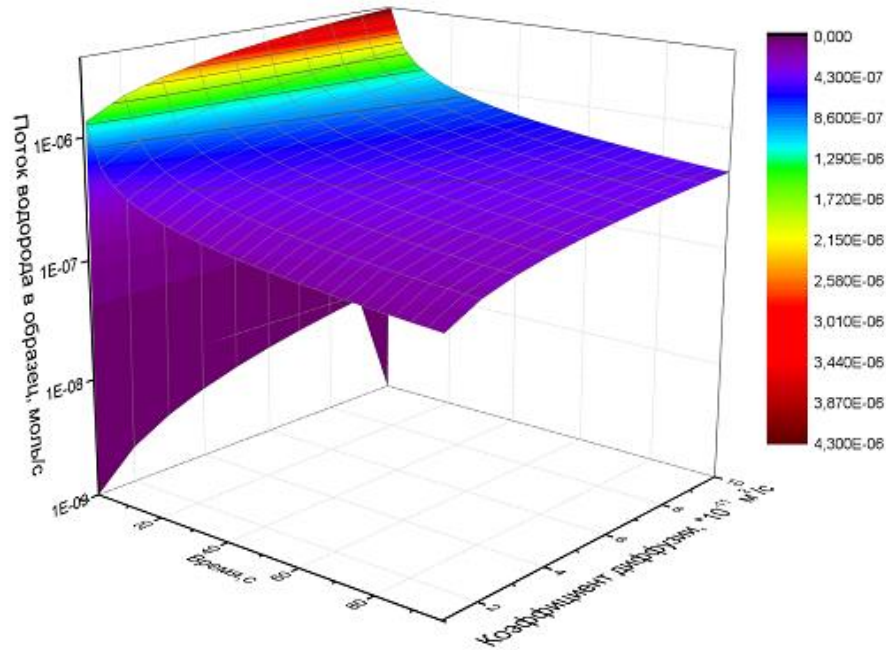


Рисунок 4.2. Временная зависимость потока водорода в образце, рассчитанная для различных коэффициентов диффузии водорода в литии

Взяв нижнюю оценку коэффициента диффузии водорода в литии как 10^{-11} м²/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. Вероятней всего это связано с изменением скорости поглощения водорода литием и процессом растворения водорода с поверхности образца. С учетом этого можно записать уравнение баланса для атомов водорода на поверхности в следующем виде:

$$\frac{\Delta N_{\text{H}}}{\Delta t} = K_{\text{прил}} \psi p S_{\text{эф}} - \chi N_0, \quad (4.6)$$

где $K_{\text{прил}}$ – коэффициент прилипания водорода, равный отношению общего числа приходящих на поверхность частиц из газовой фазы к числу адсорбированных частиц; ψ – газокинетический коэффициент, равный числу молекул, приходящих на единицу поверхности в единицу времени при единичном давлении водорода, моль/(с·Па·м²); p – давление атомов водорода; Па; $S_{\text{эф}}$ – эффективная площадь взаимодействия, равная поверхности чистого

лития, м^2 ; N_o – концентрации адсорбированных атомов жидкого лития на входной поверхности, $\text{моль}/\text{м}^2$; χ – константа скорости растворения, с^{-1} .

Далее была выполнена оценка количества атомов водорода на поверхности лития с учетом взаимодействия ионов гелия и трития с образовавшимися в приповерхностном слое гидридами лития. Известно, что в процессе проведения сорбционных экспериментов в приповерхностном слое и на поверхности жидкого лития идет образование устойчивых гидридных соединений, которые заполняют весь приповерхностный слой и покрывают практически всю поверхность. Образование гидридов происходит во всём диапазоне температур, начиная с температуры плавления лития. Суть в том, что ионы, рожденные в результате реакций лития с нейтронами, при прохождении через приповерхностный слой и поверхность лития за счет своей энергии способны разрушать гидриды тем самым освобождая место для свободных атомов лития. Значения средней длины пробега в жидком литии ионов трития и гелия (см. рис. 4.3 и 4.4), были рассчитаны с помощью формулы Бете – Блоха [86] при использовании программы LISE++.

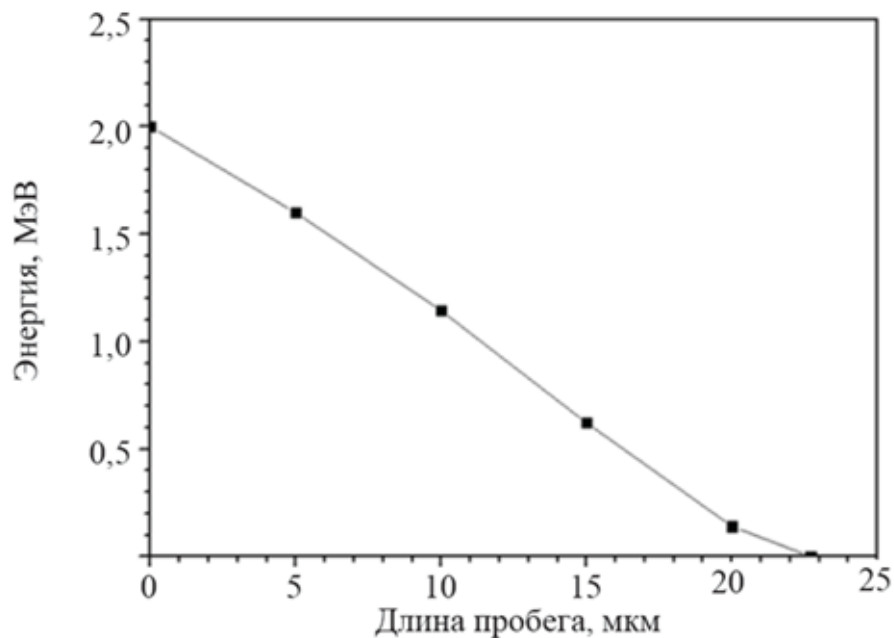


Рисунок 4.3. Зависимость длины пробега ионов трития в жидком литии от энергии

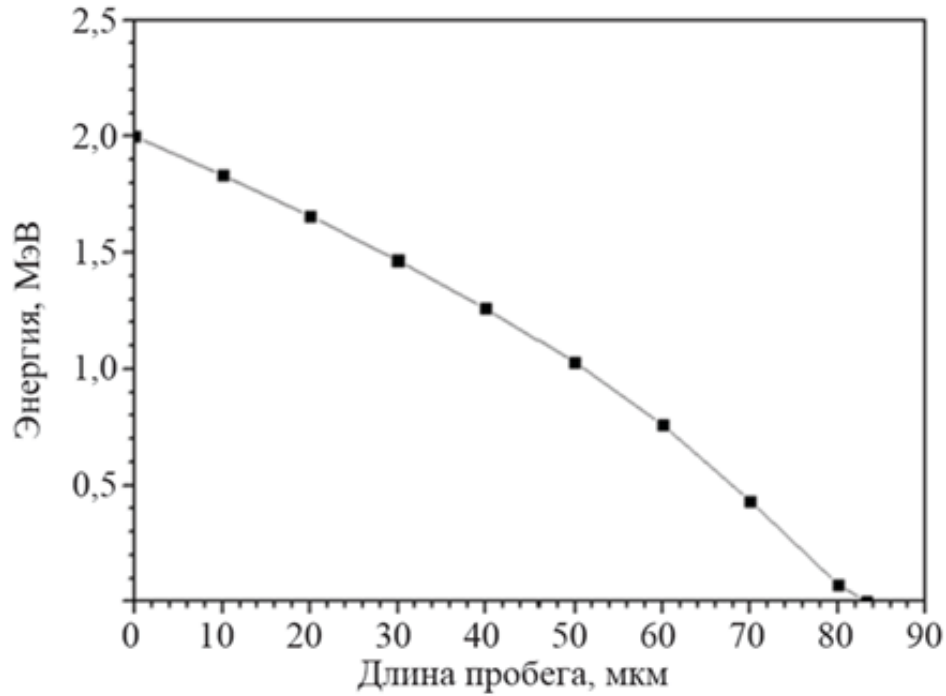


Рисунок 4.4. Зависимость длины пробега ионов гелия в жидком литии от энергии

Исходя из этого уравнение баланса (4.6) с учётом предположений об образовании на поверхности гидрида лития и его взаимодействия с ионами гелия и трития примет следующий вид:

$$N_{\text{H}}^{i+1} = N_{\text{H}}^i + \frac{P_0 \prod_{k=1}^{i-1} \left[1 - \frac{N_{\text{Li}}^0 - N_{\text{H}}^k}{N_{\text{Li}}^0} k_{\text{прит}} \Psi \frac{RT\Delta t}{V_{\text{кам}}} \right]}{N_{\text{Li}}^0} \Delta t S_0 \Psi k_{\text{прит}} (N_{\text{Li}}^0 - N_{\text{H}}^i) - \Delta t \chi N_{\text{H}}^i - N_{\text{He}} \Delta t - N_{\text{T}} \Delta t, \quad (4.7)$$

где последние члены учитывают изменение концентрации атомов водорода (дейтерия) на поверхности лития, вызванное взаимодействием гидрида лития с ионами трития и гелия.

В ходе анализа было определено что описанные диффузионные механизмы вносят вклад в зафиксированное ускорение сорбции составляет не более 5 %. Главным фактором выявленного эффекта увеличения скорости сорбции водорода жидким литием при нейтронном облучении является ускорение конвективных потоков в жидком металле.

4.2 Анализ результатов экспериментов по исследованию генерации и выделения трития из жидкого лития в условиях реакторного облучения

На следующем этапе диссертационной работы был проведен анализ результатов серии реакторных экспериментов по исследованию генерации и выделения трития из жидкого лития. На рисунке 4.5 графически приставлены механизмы взаимодействия изотопов водорода с жидким литием.

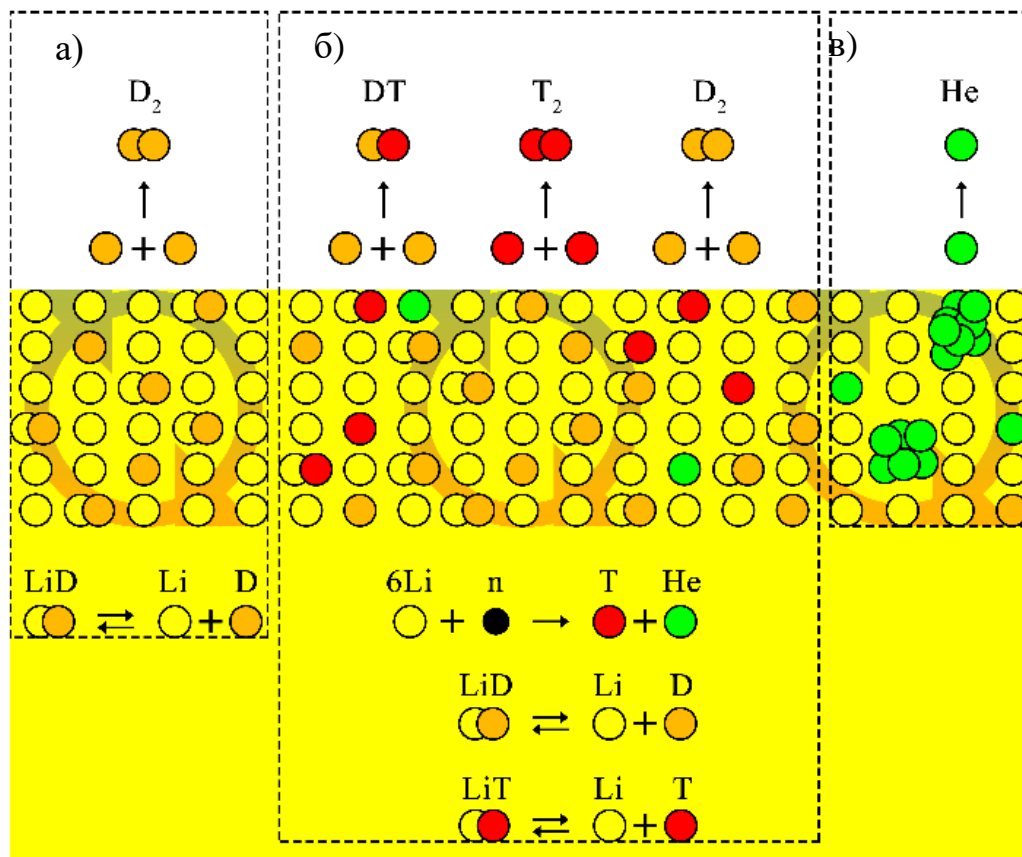


Рисунок 4.5. Общая схема взаимодействия лития с изотопами водорода: а) при насыщении дейтерием; б) наработка и выход трития из лития при облучении; в) наработка и выход гелия из лития при облучении

Процессы, происходящие в объеме жидкого лития и на его поверхности, описываются следующим образом:

- а) адсорбция молекул дейтерия на поверхности, диссоциация молекул на атомы; растворение атомов дейтерия с поверхности в объем и частичный захват дейтерия атомом лития ($Li + D \leftrightarrow LiD$);

б) генерация и выделение атомов трития и гелия, рожденных в результате ядерных реакций ${}^6\text{Li}$ с нейтронами, захват и выделение трития атомом лития, выход на поверхность из приповерхностного слоя атомов трития, гелия и дейтерия, предварительно растворенного в образце, ассоциация на поверхности атомов D и T в молекулы, десорбция с поверхности жидкого лития в виде молекул D_2 , DT, T_2 ;

в) родившиеся в результате ядерных реакций ионы гелия образуют агломерации (пузырьки), которые безактивационно выходят на поверхность и уходят с нее без какого –либо взаимодействия.

В ходе анализа экспериментальных данных была выполнена оценка качественного состава выделяющихся из лития тритийсодержащих молекул при нейтронном облучении в зависимости от температуры исследуемого образца представленные на рисунках 4.6, 4.7 и 4.8.

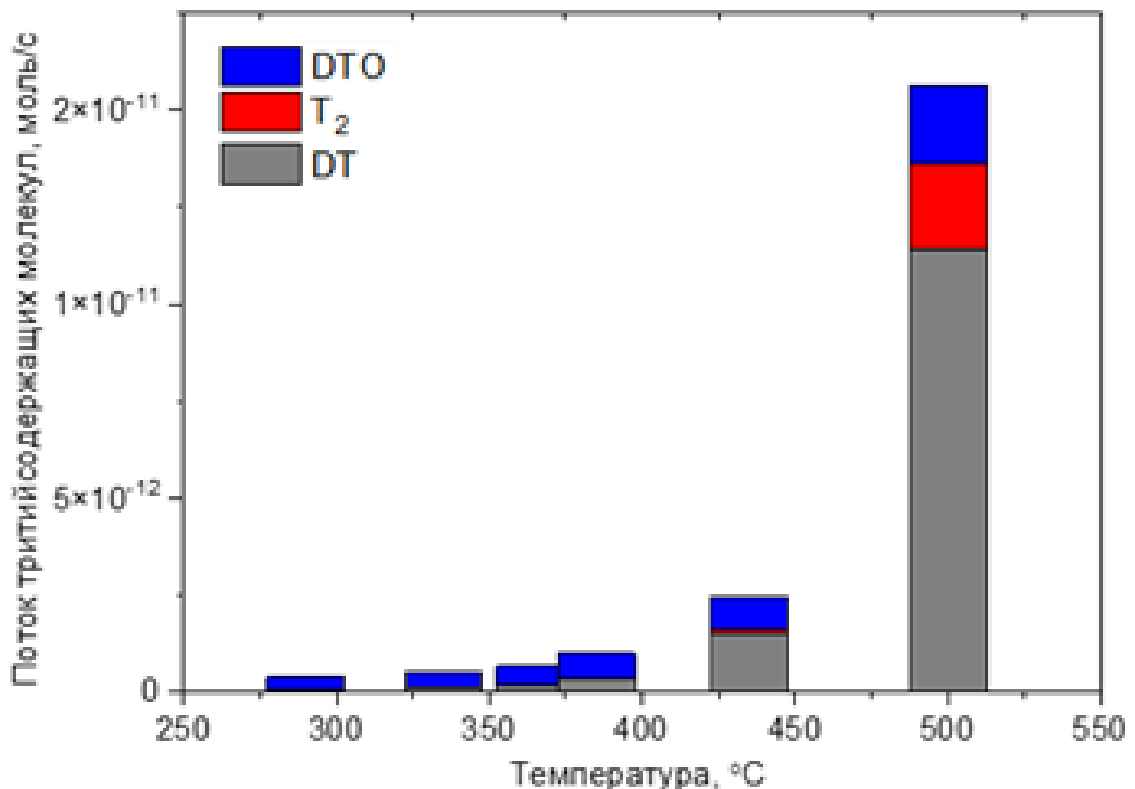


Рисунок 4.6. Зависимость среднего уровня выделения атомов трития из лития от температуры на мощности реактора 2 МВт

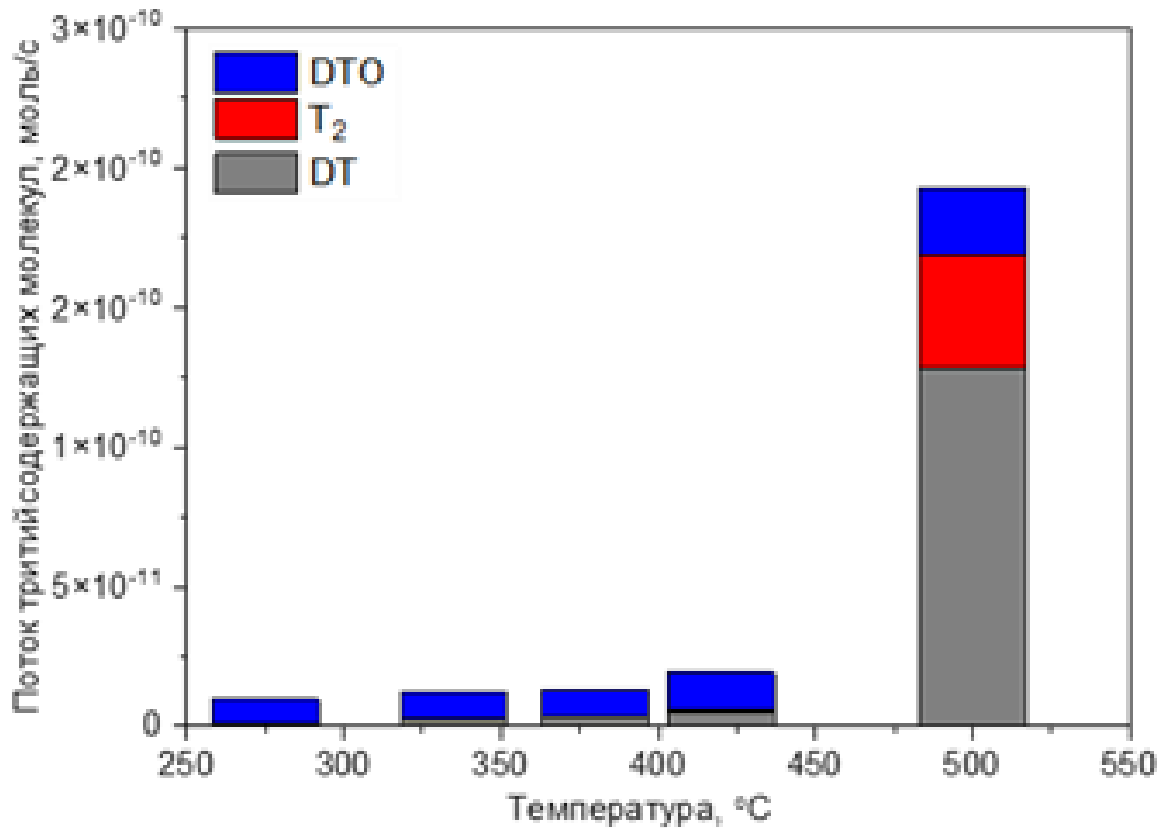


Рисунок 4.7. Зависимость среднего уровня выделения атомов трития из лития от температуры на мощности реактора 6 МВт

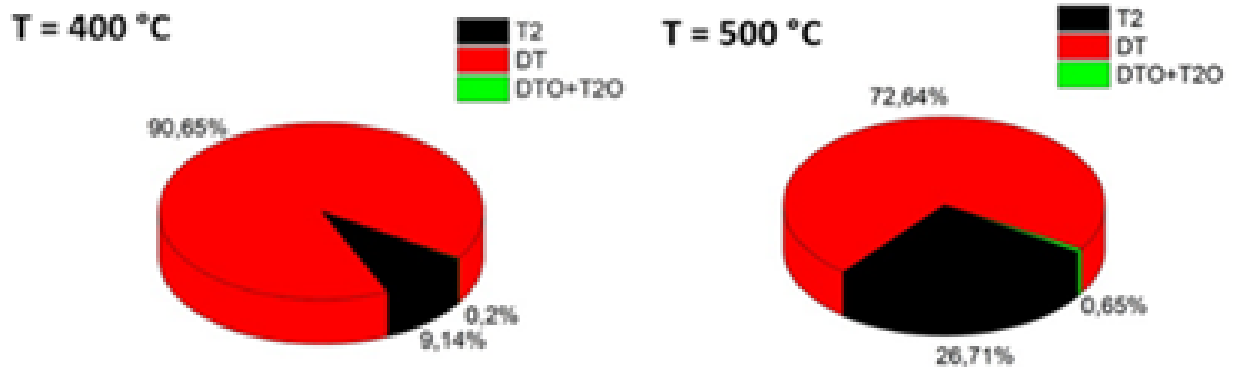


Рисунок 4.8. Вклад отдельных молекул в общее выделение трития из лития

По полученным зависимостям, определено, что выход трития, нарабатываемого в литии в процессе нейтронного облучения, происходит в виде молекул DT (а.е.м 5), T₂ (а.е.м. 6) и DTO (а.е.м 21).

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

$$N(t) = R_{tot} \cdot t, \quad (4.8)$$

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

Количество наработанных молекул трития (приведенных к T_2) и атомов гелия определялось из выражения:

$$\begin{aligned} N_{нар}^T &= \frac{R_{tot}}{2} \cdot t, \\ N_{нар}^{He} &= R_{tot} \cdot t, \end{aligned} \quad (4.9)$$

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

$$N_{выд}^T = \frac{N_{DT}}{2} + N_{T_2} + \frac{N_{DTO}}{2}, \quad (4.10)$$

где N_{DT} , N_{T_2} и N_{DTO} – количество выделившегося газа, моль равно интегралу под кривой

Далее в работе представлен расчет коэффициентов эффективности выхода трития и гелия из жидкого лития в зависимости от температуры образца и нейтронного потока. Коэффициент эффективного выделения рассчитывался по формуле:

$$K(T) = \frac{N_{выд}(T)}{N_{нар}(T)}, \quad (4.11)$$

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

На рисунке 4.9 и 4.10 представлены температурные зависимости рассчитанных коэффициентов эффективности выделения трития и гелия из жидкого лития в процессе реакторного облучения.

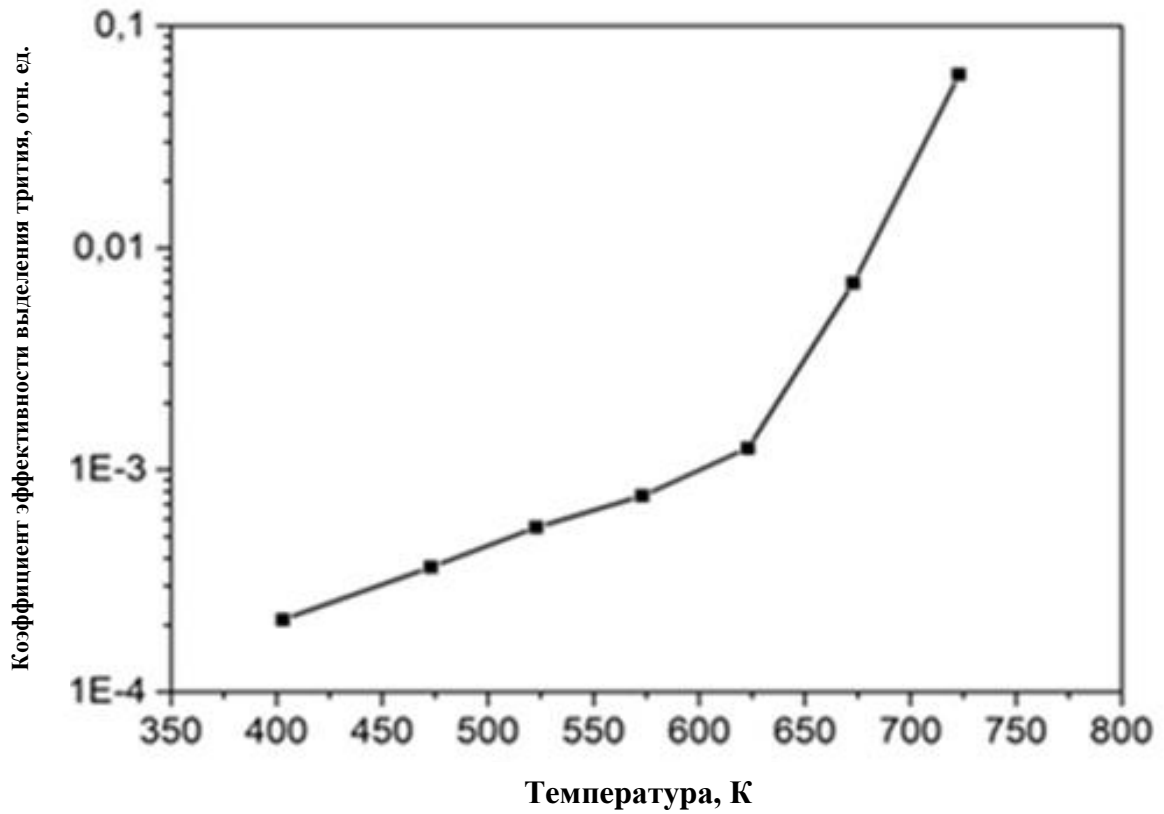


Рисунок 4.9. Зависимость коэффициента эффективности выделения трития газов из образца жидкого от температуры при реакторном облучении

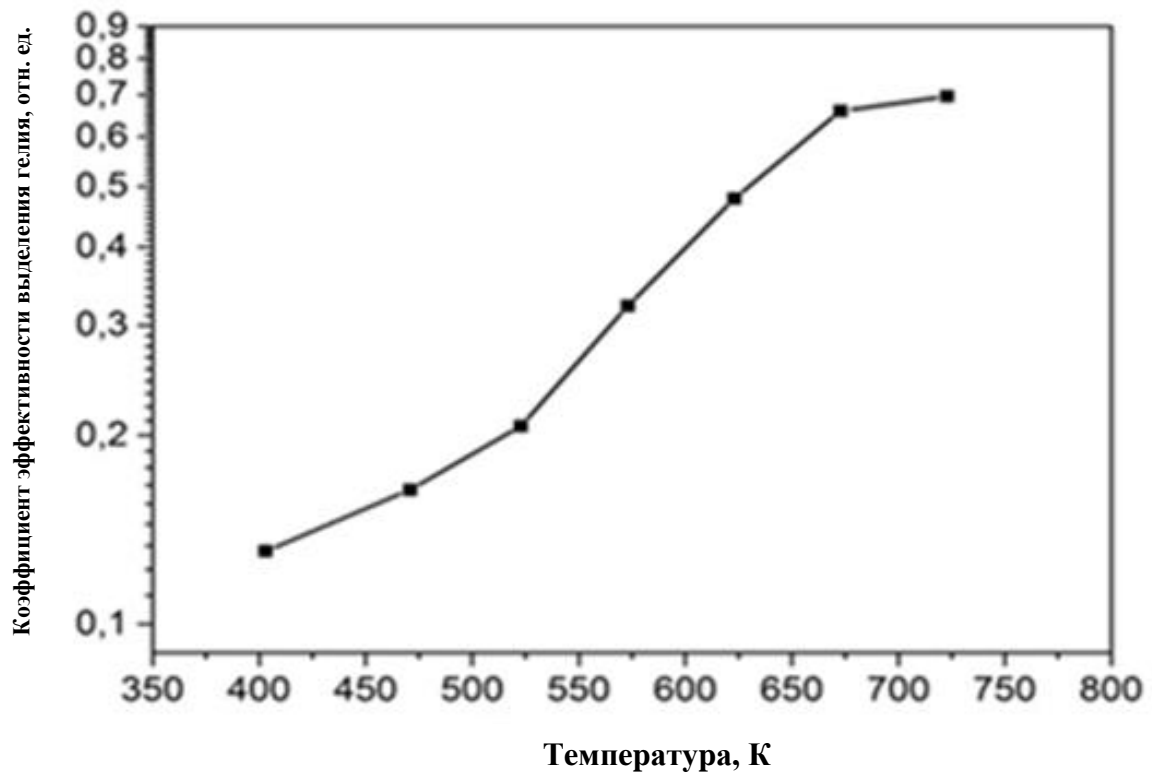


Рисунок 4.10. Зависимость коэффициента эффективности выделения гелия газов из образца жидкого от температуры при реакторном облучении

На рисунке 4.11 приведена Аррениусовская зависимость коэффициента эффективности выделения трития из жидкого лития в процессе реакторного облучения.

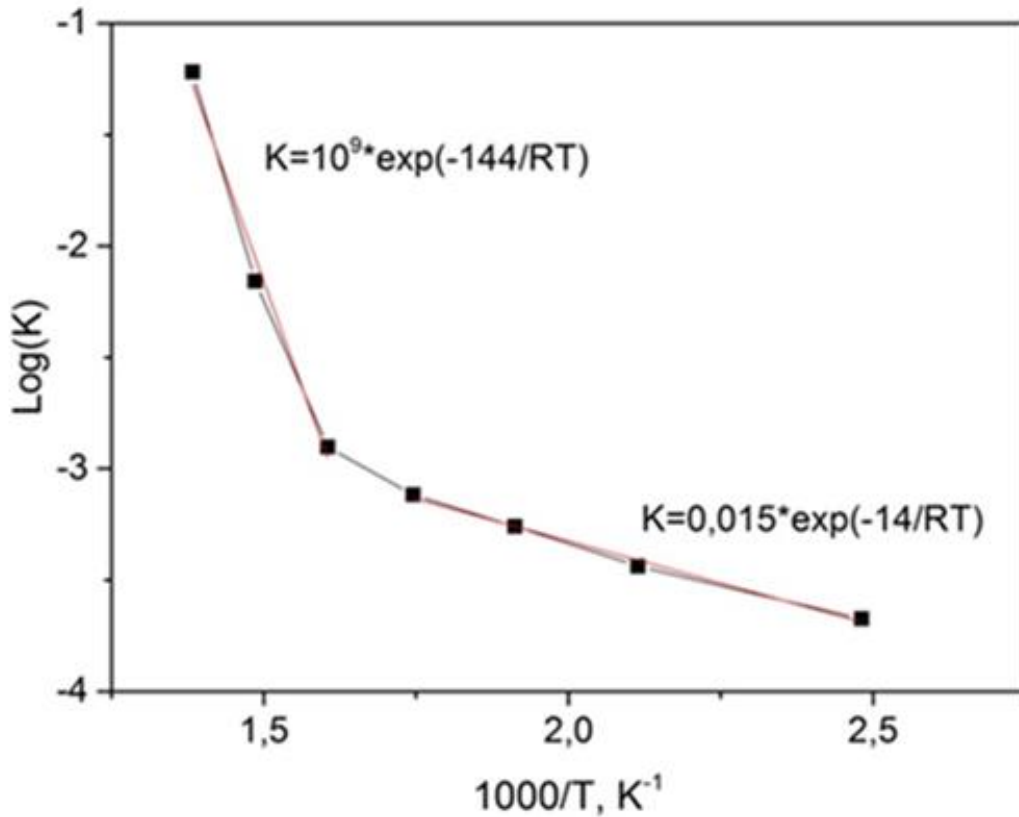


Рисунок 4.11. Аррениусовская зависимость коэффициента эффективности выделения трития из образца лития в процессе реакторного облучения

Полученные зависимости качественно свидетельствует о том, что при температуре около 350 °С меняется 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 самом 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 тритида лития в аррениусовской зависимости.

4.3 Моделирование процессов сорбции изотопов водорода жидким литием и процессов генерации и выхода трития из лития в условиях реакторного облучения

Как уже говорилось ранее главным фактором выявленного эффекта увеличения скорости сорбции водорода жидким литием при нейтронном облучении является ускорение конвективных потоков в жидком металле. С целью объяснения данного 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 (4.12) и уравнение непрерывности для сохранения массы (4.13) для нестационарного режима [87].

$$\rho \frac{du}{dt} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot \left[-\rho I + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot u)I \right] + \rho g, \quad (4.12)$$

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho u) = 0. \quad (4.13)$$

Для стационарного режима приведенные выше уравнения записываются в виде:

$$\begin{aligned} \rho(u \cdot \nabla)u &= \nabla \cdot \left[-\rho I + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot u)I \right] + \rho g, \\ \nabla \cdot (\rho u) &= 0. \end{aligned} \quad (4.14)$$

где ∇ – векторный оператор набла, ρ – плотность, u – поле скоростей; p – давление; μ – динамическая вязкость, g – гравитационная постоянная. Так как это жидкость, то для учета выталкивающих сил, создающих конвекционный перенос в модель включена гравитация. Полагаем, что ρ и μ зависят от температуры T , которая описывается уравнениями теплопереноса в жидкости,

приведённые для нестационарного (4.15) и стационарного режима (4.16), соответственно.

$$\begin{aligned} \rho C_p \frac{dT}{dt} + \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q &= Q, \\ q &= -k \nabla T. \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q &= Q, \\ q &= -k \nabla T. \end{aligned} \quad (4.16)$$

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

Результаты моделирования для жидкого лития приведены на рисунках 4.12 и 4.13.

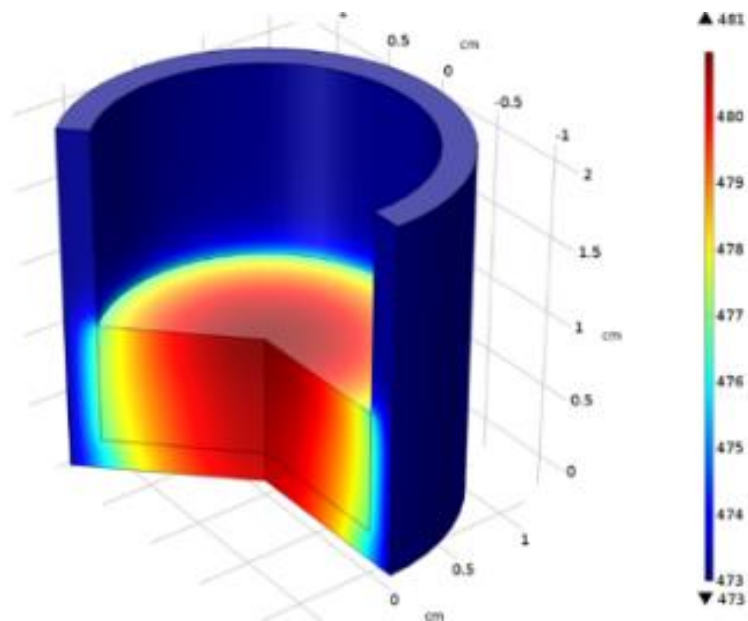


Рисунок 4.12. Температурное распределение по ячейке с образцом (мощность реактора 2 МВт, температура стенки порядка 200 °С)

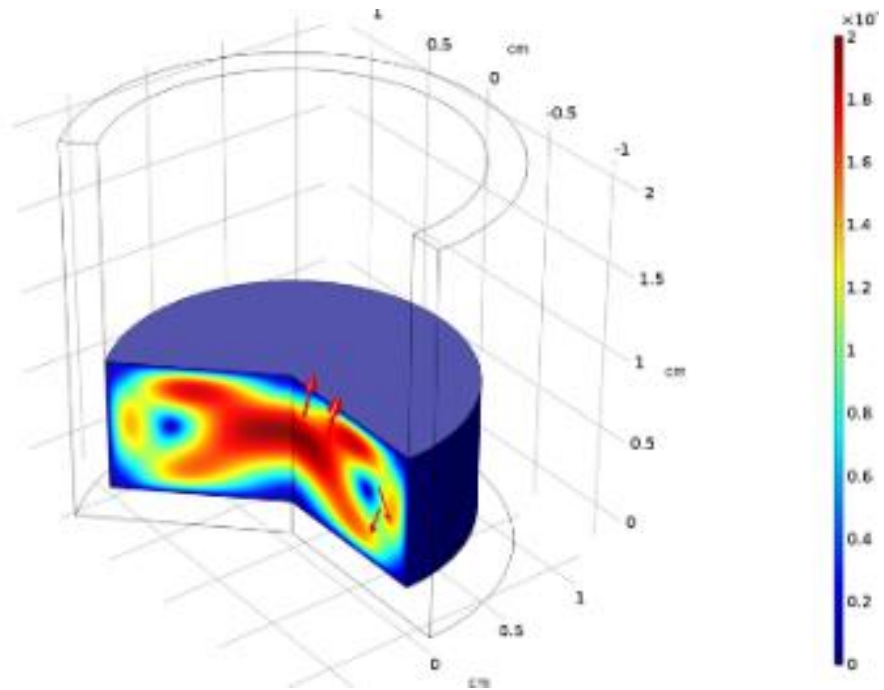


Рисунок 4.13. Распределение потоков жидкого лития в образце на мощности реактора 2 МВт при температуре стенки АУ 200 °С

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 4.14.

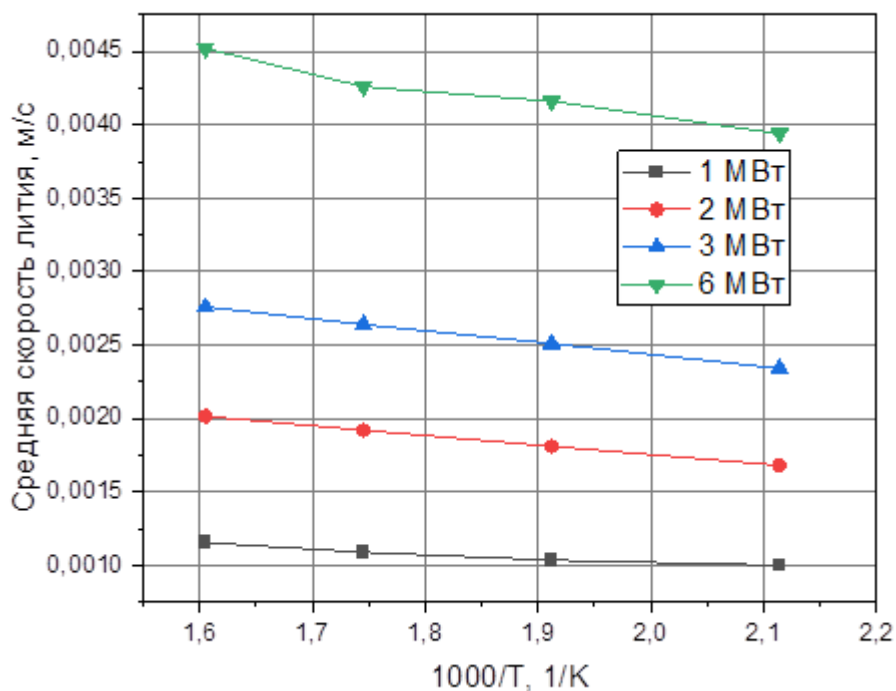


Рисунок 4.14. Зависимость средней скорости движения лития в ячейке от температуры на различных мощностях реактора

На рисунке 4.14 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, характерное распределение конвекционных потоков жидкого лития во фрагменте литиевой КПС приведено на рисунке 4.15. Моделирование показало, что скорости потоков жидкого лития в КПС составляют менее 10^{-5} м/с, что более чем на 2 порядка меньше чем в экспериментах с жидким литием.

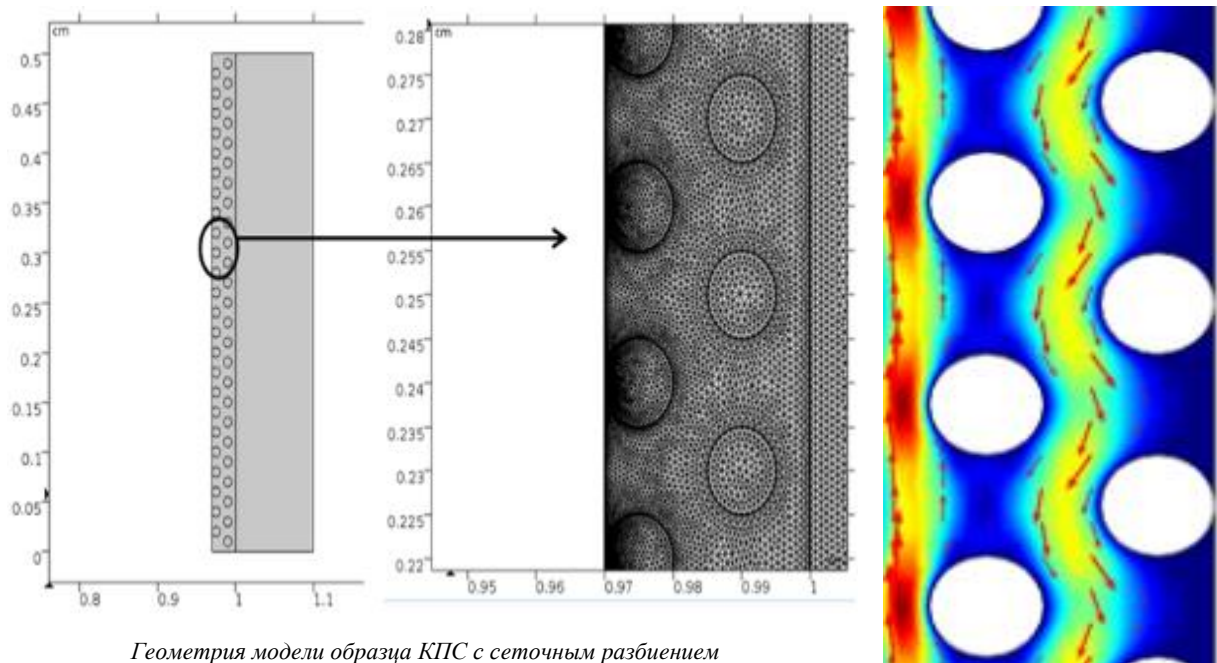


Рисунок 4.15. Распределение потоков жидкого лития в КПС при температуре 350 °С на мощности реактора 2 МВт (рисунок справа)

Результаты моделирования позволили корректно рассчитать экспериментальные значения сорбции водорода жидким литием в условиях реакторного облучения и показало существенную разницу в параметрах констант взаимодействия для образцов жидкого лития и литиевой КПС, что подтверждает предположение о существенном влиянии конвективных потоков в жидком литии на процессы сорбции.

С целью моделирования процессов генерации гелия и трития из лития в жидкой фазе 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 [88]:

$$\Phi(x, t)_{He} = D_{He} \cdot \frac{\partial C(x, t)_{He}}{\partial x} + K_{He} \cdot R_{He}. \quad (4.17)$$

где R_{He} – скорость генерации ионов гелия при реакторном облучении в приповерхностном слое, моль/с; D_{He} – для общего случая эффективная константа переноса ионов гелия, м²/с; $C(x, t)_{He}$ – концентрация ионов гелия в образце моль/см³; K_{He} – константа эффективности наработки и выхода атомов трития, образовавшихся в приповерхностном слое в результате реакции $Li^6(n, \alpha)He^3$.

Для гелия взаимодействие с атомами лития можно не учитывать, гелий обычно нейтрален для любых взаимодействий, в то время как тритий эффективно взаимодействует с литием.

Общее выражение переноса ионов трития в поверхностном слое, для одномерного случая, будет иметь вид [89]:

$$\Phi(x, t)_T = D_T \cdot \frac{\partial C(x, t)_T}{\partial x} + K_T \cdot R_T - k_{cap} \cdot C(x, t)_T + k_{rel} \cdot C_{trap}(x, t)_T, \quad (4.18)$$

$$\frac{\partial C(x, t)_T}{\partial x} = k_{cap} \cdot C(x, t)_T - k_{rel} \cdot C_{trap}(x, t)_T,$$

где, R_T – скорость генерации атомов трития в приповерхностном слое при нейтронном облучении, моль/с; D_T – в общем случае эффективная константа переноса атомов трития м²/с; $C(x, t)_T$ – концентрация атомов трития моль/см³; K_T – константа эффективности генерации и выделения атомов трития,

образовавшихся в приповерхностном слое в результате реакции ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$; k_{cap} – константа захвата трития литием, 1/с; k_{rel} – константа выделения трития из LiT, 1/с; $C_{trap}(x, t)_T$ – концентрация LiT моль/см³

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 меняется.

Используя систему уравнений 4.18 была выполнено моделирование процессов выделения трития из лития в жидкой фазе. Температурная зависимость свободных атомов трития в жидком литии и сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования приведены на рисунке 4.16.

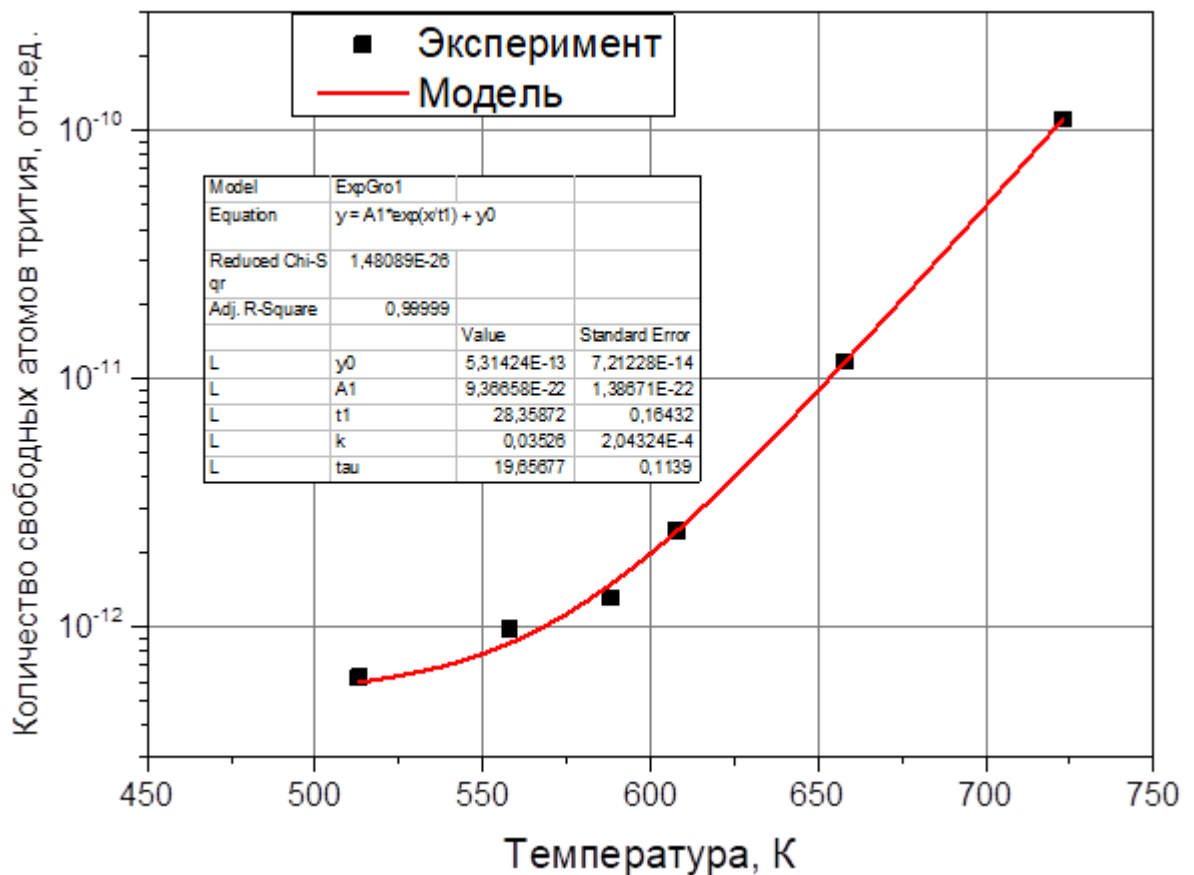


Рисунок 4.16. Зависимость относительной концентрации свободных атомов трития образующихся в жидком литии при реакторном облучении от температуры

Замечено, что увеличение свободных атомов трития в жидком литии зависит от температуры и количество их растет экспоненциально, что соответствует константе скорости распада тритида лития в аррениусовской зависимости. Рассчитанные значения позволили оценить энергию активации освобождения трития из ловушек, а по сути, энергию активации процесса распада тритида лития, которая в свою очередь составила порядка 16 кДж/моль.

По результатам анализа реакторных экспериментов с жидким литием были сделаны следующие основные выводы: из-за инертности гелий и 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). Существенное влияние на выход гелия из лития в условиях нейтронного облучения оказывает неравномерность энергосвечения 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. 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. При этом нужно учитывать, что плотность, динамическая вязкость и коэффициент поверхностного натяжения в самом литии падают с увеличением температуры, что может тоже влиять на рост коэффициента диффузии трития в литии.

Заключение

В результате выполненной работы были 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.

С использованием адсорбционного, масс-спектрометрического 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.

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 тепловых нейтронов с ядрами изотопа лития-6.

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 T₂.

Разработана модель, описывающие механизмы воздействия нейтронного излучения на параметры сорбции (десорбции) изотопов водорода жидким литием которая позволила корректно интерпретировать, полученные

в экспериментах значения сорбции изотопов водорода жидким литием в условиях реакторного облучения, и показало существенную разницу в параметрах констант взаимодействия для образцов жидкого лития и литиевой КПС, что подтверждает предположение о существенном влиянии конвективных потоков в жидком литии на процессы сорбции. Рассчитаны константы взаимодействия водорода, дейтерия трития с жидким литием, определены и описаны температурные зависимости скорости потоков жидкого лития в образце при различных мощностях реактора.

Разработана модель, описывающая механизмы воздействия нейтронного излучения на процессы генерации и выхода трития из лития, построена Аррениусовская зависимость коэффициента эффективности выделения трития из лития в процессе реакторного облучения, определены коэффициенты эффективности выделения гелия и трития из жидкого лития в процессе реакторного облучения, определена энергия активации процесса высвобождения трития из ловушек (распад тритида) при температуре выше 500 °С, которая составила порядка 16 кДж/моль.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Mazzitelli, G. FTU results with a liquid lithium limiter / G. Mazzitelli [et al.] // Nuclear Fusion.– Vienna: IAEA, 25 May 2011.– Vol. 51, № 7.
- 2 Kugel, H.W. NSTX plasma operation with a Liquid Lithium Divertor. / H.W. Kugel [et al.] // Fusion Engineering and Design.– 10 October 2012.– Vol. 87.– P. 1724 –1731.
- 3 Mirnov, S.V. Recent lithium experiments in tokamak T –11M / S.V. Mirnov [et al.] // Journal of Nuclear Materials.– July 2013.– Vol. 438, Supplement.– P. S224 –S228.
- 4 Golubchikov, L.G. Development of a liquid –metal fusion reactor divertor with a capillary –pore system / L.G. Golubchikov [et al.] // J. Nucl. Mater.– 1996.– Vol. 233 –237.– P. 667 –672.
- 5 Zharkov, M.Yu. Development of Lithium CPS Based Limiters for Realization of a Concept of Closed Lithium Circulation Loop in Tokamak / M.Yu. Zharkov [et al.] // Physics Procedia.– 2015.– Vol. 71.– P. 47 –51.
- 6 Mirnov, S.V. Experimental test of the system of vertical and longitudinal lithium limiters on T –11M tokamak as a prototype of plasma facing components of a steady –state fusion neutron source / S.V. Mirnov [et al.] // Nucl. Fusion.– 2015.– 55 123015.
- 7 Mazzitelli, G. Experiments on FTU with an actively water cooled liquid lithium limiter / G. Mazzitelli [et al.] // Journal of Nuclear Materials.– August 2015.– Vol. 463.– P. 1152 –1155.
- 8 Scotti, F. Lithium sputtering from lithium –coated plasma facing components in the NSTX divertor / F. Scotti [et al.] // Journal of Nuclear Materials.– August 2015.– Vol. 463.– P. 1165 –1168.
- 9 Chen, Zhaoxi Preliminary design and performance study of EAST liquid lithium limiter based on CPS / Zhaoxi Chen [et al.] // Fusion Engineering and Design.– 11 November 2014.– Vol. 89.– P. 2685 –2690.
- 10 Lyublinski, I.E. Development of lithium and tungsten limiters for test on T –10 tokamak at high heat load condition / I.E. Lyublinski, A.V. Vertkov, M.Yu.

Zharkov, V.A. Vershkov, S.V. Mirnov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.– 2016.– Vol.130.– 012019.

11 Tabarés, Francisco L. First liquid lithium limiter biasing experiments in the TJ –II stellarator / Francisco L. Tabarés [et al. TJ –II Team] // Journal of Nuclear Materials.– August 2015.– Vol. 463.– P. 1142 –1146.

12 Lyublinski I.E. Status of design and experimental activity on module of lithium divertor for KTM tokamak. / I.E. Lyublinski [et al.] // Fusion Engineering and Design.– 2013.– Vol. 88.– P. 1862 –1865.

13 Ponkratov, Yu. Determination of tritium generation and release parameters at lithium CPS under neutron irradiation / Yuriy Ponkratov, Viktor Baklanov, Mazhyn Skakov, Timur Kulsartov, Irina Tazhibayeva, Yuriy Gordienko, Zhanna Zaurbekova, Yevgeniy Tulubayev, Yevgeniy Chikhray, Igor Lyublinski, Alexey Vertkov // Fusion Engineering and Design.– 2016.– V. 109 –111.– P. 52 –56.

14 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.

15 Tazhibayeva, I. Results of reactor irradiation of liquid lithium saturated with deuterium / I.Tazhibayeva, Y.Ponkratov, T.Kulsartov, Y.Gordienko, M.Skakov, Z.Zaurbekova, I.Lyublinski, A.Vertkov, G.Mazzitelli // Fusion Engineering and Design.– 2017.– V. 117.– P. 194 –198.

16 Zaurbekova, Z. Investigation of hydrogen isotopes interaction processes with lithium under neutron irradiation / Z. Zaurbekova, M. Skakov, Yu. Ponkratov [et al.] // Fusion Engineering and Design.– 2016.– V. 109 –111.– P. 26 –29.

17 Тулубаев, Е.Ю. Технология изготовления литиевой КПС на основе карбоновой ткани, армированной УНТ / Е.Ю. Тулубаев [и др.] // Вестник НЯЦ РК.– 2018.– Вып. 1 (73).– С.20 –27.

18 Прозорова, И.В. Расчетные оценки энерговыделения и скоростей наработки ^3H , ^4He в литиевой КПС при ее облучении на реакторе ИВГ.1М / И.В. Прозорова [и др.] // Вестник НЯЦ РК.– 2018.– Вып. 1(73).– С. 91 –96.

19 Патент РК на полезную модель № 2716. Способ изготовления исследовательских образцов литиевой капиллярно –пористой структуры / Ю.В. Понкратов, М.К. Скаков, Х.А. Абдуллин, В.В. Бакланов, Н.И. Барсуков, Ю.Н. Гордиенко, Ж.А. Заурбекова, Т.В. Кульсартов, Е.В. Чихрай.– Оpubл. 23.04.2018; Бюл. № 15.– 1 с.

20. Evtikhin, V. A. Liquid Lithium Tokamak Reactor / V. A. Evtikhin [et al.] // Fusion Energy: Proc. 16th IAEA Conf. on Fusion Energy, Montreal, Vienna. – 1997. – Vol. 3. – P. 659–665.

21. Люблинский, И. Е. Применение жидкого лития в системах энергетического термоядерного реактора/ И. Е. Люблинский, В. А. Евтихин, А. В. Вертков // Журн. перспективные материалы. – 2005, № 6. – С. 5–17.

22. Nygren, R. E. A fusion reactor design with a liquid first wall and divertor / R. E. Nygren, T. D. Rognlien, M. E. Rensink // Fus. Eng. Des. – 2004. – Vol. 72. – P. 181–221.

23. Быстров, П. И. Жидкометаллические теплоносители тепловых труб и энергетических установок / П. И. Быстров [и др.]. – М. : Наука, 1988.

24. Гришин, В. К. Свойства лития / В. К. Гришин, М. Г. Глазунов, А. Г. Аракелов. – М.: Металлургиздат, 1963.

25. Субботин, В. И. Физико –химические основы применения жидкометаллических теплоносителей / В. И. Субботин, М. Н. Ивановский, М. Н. Арнольдов. – М. : Атомиздат, 1970.

26. Ihle, H. Chemical thermodynamics of fusion reactor breeding materials and their interaction with tritium / H. Ihle, C. Wu. // J. Nucl. Mater. – 1985. – Vol. 130. – P. 454–464.

27. Maroni, V. A. A review of the chemical, physical and thermal properties of lithium that are related to its use in fusion reactors / V. A. Maroni, E. J. Cairns, F. Cafasso. – Rep. : ANL–8001, 1973.

28. Материаловедение жидкометаллических систем термоядерных реакторов / Г. М. Грязнов [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1989.
29. Литий / В. И Субботин [и др.]. – М. : ИздАТ, 1999.
30. Ивановский, М. Н. Физические основы тепловых труб / М. Н. Ивановский, В. П. Соркин, И. В. Ягодкин. – М. : Атомиздат, 1978.
31. Ohse, Ed. R.W. Handbook of thermodynamic and transport properties of alkali metals / Ed. R.W. Ohse. – Oxford : Blakwell Sci. Publ., 1985.
32. Григорьев, И. С. Физические единицы. Справочник / И. С. Григорьев, Е. З. Мелихов. – М. : Энергоатомиздат, 1991.
33. Ивановский, М. Н. Испарение и конденсация металлов / М. Н. Ивановский, В. П. Соркин, В. И. Субботин. – М. : Атомиздат, 1976.
- 34 Gasini, G. Liquid metal in fusion power reactors / G. Gasini [et al] // Liquid metal engineering and technology. –1984. – London: BNES. – Vol.3. – P.303 –316.
- 35 Borgstedt, H. U. Applied chemistry of the alkali metals / H. U. Borgstedt , C. K Mathews. – N. – Y., London, 1987.
- 36 Handbook of Thermodynamic and Transport Properties of Alkali Metals. Ed. R. W. Ohse/ IUPAC. Chemical Data № 30. Blackwell Scientific Publ. – London –Oxford, 1985.
- 37 Шпильрайн Э.Э. Теплофизические свойства гидрида, дейтерида и тритида лития и их растворов с литием: справ. / Э.Э. Шпильрайн, К.А. Якимович, Т.Н. Мельникова [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1983.
- 38 Badger V. UWMAK –I. A Wisconsin Toroidal Fusion Reactor Design Study. University of Wisconsin, UWFDМ –68, 1974.
- 39 Муравьев Е.В. Контактные устройства дивертора и лимитера реактора токамака. I. Устройства с жидкометаллической рабочей поверхностью. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 1980, вып. 2, с. 57—64.
40. Baker C.C., Abdou M.A., DeFreece D.A., Trachsel C.A., Graumann D., Kokoszanski J. STARFIRE — a commercial tokamak reactor. — In: Proc. 8th Symp. Eng. Probl. Fusion Res., 1979, vol. 3, p. 1614— 1619.

41. Hunt J.C.R. The use the liquid lithium as a coolant in a toroidal fusion reactor. Part 1: calculation of the pumping power, CLRM –73993, 1972.
42. Karasev V.G., Lielausis O.A., Murav'ev E.V., Tananaev A.V. Liquid metal in fusion reactors with magnetic confinement. — In: Proc. 4th IAEA TCM on Fusion Reactor Design and Technology. Yalta, 26 May — 6 June, 1986, IAEA –TC –392.3/51, IAEA, Vienna, 1987, vol. 2, p. 239—272
43. Зимин С.А. Некоторые нейтронно –физические параметры материалов. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 1985, вып. 3, с. 35—37.
44. Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Pistunovich V.I., Vertkov A.V., Prokhorov D.Yu., Pozharov V.A., Korzhavin V.M., Golubchikov L.G. Liquid lithium tokamak reactor. — Fusion Energy, 1996, Proc. 16th IAEA Conf. on Fusion Energy. Montreal, 1996. IAEA, Vienna, 1997, vol. 3, p. 659—665.
- 45 Moir R.W. Liquid first walls for magnetic fusion energy configurations. — Nucl. Fusion, 1997, vol. 37, p. 557—566.
- 46 Соколов Ю.А., Альтовский И.В., Борисов А.А. и др. Разработка концепции демонстрационного термоядерного реактора ДЕМО. — ВАНТ. Сер.Термоядерный синтез, 1997, вып. 1—2, с. 3—13.
- 47 Ulrickson M.A. A review of plasma facing materials, past, present and future. — In: Program and collected abstracts ICFRM –8. Sendai, Japan, Oct. 26—31, 1997, p. 128.
- 48 Водяник В.О., Демьяненко В.Н., Колесниченко А.Ф., Мирнов С.В., Муравьев Е.В. Жидкометаллический лимитер токамака. Первые результаты.— Физика плазмы, 1988, т. 14, с. 628—632.
- 49 Mirnov S.V., Dem'yanenko V.N., Murav'ev E.V. Liquid –metal tokamak divertors. — J. Nucl. Mater., 1992, vol. 196—198, p. 45—49
- 50 Kirillov I.R., Muraviev E.V. Review of liquid metal divertor concepts for tokamak reactor. — Fusion Technology, 1996, p. 251—254; Elsevier Science B.V., 1997.
- 51 Mattas R.F. et al. ALPS –advanced limiter –divertor plasma –facing systems. — Fus. Eng. Design, 2000, vol. 49—50, p. 127—134.

52 Основы концепции демонстрационного термоядерного реактора ДЕМО –С. Проект РФ ДЕМО. Часть IV. Описание конструкции систем и режимов работы реактора. ИЯС РНЦ «Курчатовский институт», М., 2000.

53 Mirnov S.V., Evtikhin V.A. The tests of liquid metals (Ga, Li) as plasma sacing components in T –3M and T11M tokamaks. — Fus. Eng. Design, 2006, vol. 81, p. 113—119.

54 Pitts J.H. A consistent HYLIFE wall design that withstands transient loading conditions. — In: Proc. of the Fourth ANS Topical Meeting on the Technology of Controlled Nuclear Fusion. King of Prussia, PA, 14—17 Oct., 1980.

55 Wells W. A system for handling divertor ion and energy flux based on lithium droplet cloud. — Nucl. Technol./Fus., 1981, vol. 1, p. 120.

56 Baranov V. Liquid metal film flow for fusion application. — In: Proc. of the Seventh Beer Sheva Int. Seminar on Liquid Metal Magnetogidrodinamics, 1983.

57 Bond A. A liquid metal protected divertor for a demo reactor. — In: Proc. of the 13th Symposium on Fusion Technology. Varese, Italy, 1984, p. 1225.

58 . Liao C. A feasibility assessment of liquid –metal divertors. — Fus. Technol., 1992, vol. 21, p. 1845— 1851.

59 Muraviev E. Liquid –metal –cooled divertor for ARIES. — Fus. Eng. Design, 1995, vol. 29, p. 98—104.

60 . Muraviev E. Open surface MHD flow of liquid metal coolant in a rotating divertor target of a Tokamak fusion reactor. — Magnetohydrodynamic, 1995, vol. 31, p. 306.

61 Мирнов С.В., Евтихин В.А. Применение Ga и Li как материала лимитеров в токамаках Т –3М и Т –11М. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2005, вып. 4, с. 3—18

62. Петров, В.Б. Эмиссия лития с жидкой поверхности под воздействием энергетической нагрузки / В.Б. Петров, Б.И. Хрипунов, В.В. Шапкин, Н.В. Антонов // Вопросы атомной науки и техники, Сер. Термоядерный синтез. – 2004.– Выпуск № 4.– С. 23 –32.

63. Хрипунов, Б.И. Литиевая капиллярно –пористая система под воздействием больших потоков энергии в стационарных условиях / Б.И. Хрипунов, В.Б. Петров, В.В. Шапкин [и др.] // Вопросы атомной науки и техники, Сер. Термоядерный синтез. – 2002.– Выпуск № 3.– С. 31 –38.

64. Evtikhin, V. A., [et al.] // Ibid. – 2001. Vol. 55 – 57, P. 363 – 367.

65. Antonov, N. V. Steady –state lithium plasma and liquid lithium divertor experimental validation / N. V. Antonov, V. A. Evtikhin, V. I. Khripunov, I. E. Lyublinski, V. B. Petrov, V. V. Shapkin, A. V. Vertkov // Fusion Energy: Proc. 16th IAEA Conf. on Fusion Energy. Montreal. – 1996. – Vol. 3. – P. 651 – 658.

66. Evtikhin, V. A. Lithium divertor concept and results of supporting experiment / V. A. Evtikhin, I. E., [et al.] // In: Proc. Of IAEA/TCM on Divertor Concepts., Aix en Provence, France, Sept. 11–14, 2001. – Plasma Physics and Controlled Fusion., 2002, № 6. – Vol. 44. – P. 955–977.

67. Evtikhin, V. A. Calculation and experimental investigation of fusion reactor divertor plate and first wall protection by capillary –pore systems with lithium / V. A. Evtikhin [et al.] // J. Nucl. Mater. – 1999. – Vol. 271 –272. – P. 396–400.

68. Ivanov L. I. Investigation of the pulse plasma stream influence on the lithium capillary –porous system / L. I. Ivanov [et al.] // J. of Nuclear Research “Nukleonika”. – 2001. – Vol. 46. – P. 113–115.

69. Evtikhin, V. A. Calculation and experimental investigation of fusion reactor divertor plate and first wall protection by capillary –pore systems with lithium / V. A. Evtikhin [et al.] // J. Nucl. Mater. – 1999. – Vol. 271–272. – P. 396–400.

70. Strachan. J. D. Nuclear Fusion / J. D. Strachan, M. Bell, M. Bitter [et al.] // Nuclear Fusion. – 1993. – Vol. 33. – P. 991.

71. Kondo, K., [et al.] // J. Nucl. Materials. – 1997. – Vol. 241,243. – P. 956.

72. Evtikhin, V. A. Design, calculation and experimental studies for liquid metal system main parameters in support of the liquid lithium fusion reactor / V. A.

Evtikhin, [et al.]// Fusion Energy: IAEA, Vienna. – 1998. – IAEA –CSP –1/P, 1999. – Vol. 4. – P. 1309 – 1312.

73. Литий в термоядерной и космической энергетике XXI века / В. Н. Михайлов [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1999. – С. 528.

74. Evtikhin V. A. Main direction and recent test modeling results of lithium capillary –pore systems as plasma facing components / V. A. Evtikhin [et al.] // Plasma Science and Technology. – 2004. – Vol. 6, №. 3. – P. 2291 – 2295.

75. Evtikhin, V. A. Experimental Study on Tokamak Plasma Interaction with Lithium Capillary –Pore Systems / V. A. Evtikhin, I. E. Lyublinski, A. V. Vertkov, E. A. Azizov, S. V. Mirnov, V. B. Lazarev, S. M. Sotnikov. // IAEA, 2001. – IAEA –CSP –8/C an IAEA CD –ROM, EXP4/21.

76. Лазарев, В. Б. Физика плазмы / В. Б. Лазарев, А. Г. Алексеев, А. М. Белов // 2002. – Т. 28. – С. 1.

77 Terai T. In –reactor tritium release experiment from molten lithium alloy (Li17Pb83) / T. Terai, S. Nagai, Y. Takahashi // J.Nucl.Mater.– 1991.– Vol. 179 – 181.– P. 871 –874.

78 Terai T. Diffusion coefficient of tritium in molten lithium lead alloy (Li17Pb83) under neutron irradiation at elevated temperatures / T. Terai, S. Nagai, Y. Takahashi, T. Yoneoka // J.Nucl.Mater.– 1992.– Vol. 187.– P. 247 –253.

79 Terai T. Mass transfer coefficient of tritium from molten lithium lead alloy (Li17Pb83) to environmental gas under neutron irradiation / T. Terai, S. Nagai, Y. Takahashi, T. Yoneoka // Fus. Eng. Des.– 1991.– Vol. 17.– P. 237 –241.

80 Doerner R.P. [et al.].– Ibid., 2003. – Vol. 313 –316. – P. 383 –387.

81 Гейнце, В. Введение в вакуумную технику. – М. –Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 512с.

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

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

84 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.

85 Crank J. The mathematics of diffusion. – Oxford: Oxford University press, 1975. – 425 p.

86 К.Н. Мухин. Экспериментальная ядерная физика. В 3 –х тт. СПб.: Издательство «Лань», 2008. Т.1

87 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.

88 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.

89 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.