

20396

14-2006-35

На правах рукописи
УДК 539.125.516.22,
539.125.523.348, 539.125.523.5,
621.039.532, 539.12.04

K-901

КУЛИКОВ
Сергей Александрович

**ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАМЕДЛИТЕЛЕЙ НЕЙТРОНОВ
ДЛЯ ВЫСОКОПОТОЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ**

Специальность: 01.04.07 — физика конденсированного
состояния

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Ученый институт
Физико-математических наук
ИДубна 2006

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики
им. И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Е.П. Шабалин

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
А.Г. Новиков

кандидат физико-математических наук
С.Ф. Сидоркин

Ведущая организация:
ФГУП Научно-исследовательский и конструкторский институт
энерготехники им. Н.А. Доллежала, Москва

Защита состоится « 9 » июня 2006 г. в 15⁰⁰ часов
на заседании диссертационного совета Д.720.001.06 при
Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка и Лаборатории
ядерных реакций им. Г.Н. Флерова Объединенного института
ядерных исследований
по адресу: 141980, ул. Жолио-Кюри, 6, г. Дубна, Московская
область.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан « 19 » апреля 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета  А.Г. Попеко

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Тенденции развития исследований в физике твердого тела в настоящее время направлены на использование в экспериментах нейтронов с длиной волны более 4 Å. Снижение энергии быстрых нейтронов источника вплоть до их термализации осуществляется в замедлителях нейтронов, которые являются «посредниками» между источником нейтронов (будь то исследовательские ядерные реакторы, источники на основе реакций «spallation» или др.) и инструментами физических экспериментов. Создание нужного спектра внешних нейтронных пучков происходит как в тепловых так и в криогенных замедлителях работающих при температуре замедляющего материала 20К+100К. Использование криогенных замедлителей нейтронов дает повышенный выход «холодных» нейтронов, что в свою очередь позволяет сократить время необходимое для проведения одного эксперимента, а также проводить те эксперименты, проведение которых было бы невозможно без такого замедлителя из-за их продолжительности. Другим, но не менее важным аргументом в пользу использования криогенных замедлителей является экономический. Поскольку использование криогенных замедлителей позволяет получать сравнимые интенсивности нейтронов на более слабых источниках без строительства новых, требующих огромных экономических затрат.

При создании комплекса замедлителей для источника нейтронов необходимо проведение предварительной исследовательской работы заключающейся в выборе материала, толщины самих холодных замедлителей и предзамедлителей, оптимизация размещения и т.д. Весь этот комплекс исследований позволяет более эффективно использовать источник нейтронов. К таким источникам, в частности, относится исследовательский модернизированный реактор ИБР-2М.

Для замедления нейтронов до тепловых энергий как правило используется обычная вода, использование же большинства водородсодержащих материалов для холодных замедлителей затруднительно в связи с проблемами радиационной

стойкости. В ныне действующих замедлителях в качестве замедляющего вещества используют обычную воду, жидкий водород, жидкие углеводороды (метан, пропан), твердый метан [1–5]. Возможно также применение льда, полиэтилена, замороженных смесей метана с инертным газом или ненасыщенными углеводородами, метана в цеолитах, гидратов метана, аммиака, ароматических углеводородов (в частности, триметилбензола (мезитилена)) и др. Поэтому при проектировании криогенных замедлителей нейтронов, при достаточно богатом выборе материалов, необходимо отдать предпочтение какому-то одному, который бы наиболее подходил для использования.

На существующих на сегодняшний день источниках нейтронов чаще всего применяемым веществом для криогенных замедлителей является жидкий водород. Главное его достоинство – отсутствие радиолиза и радиационных эффектов. Однако термализация нейтронов в жидководородном замедлителе происходит не полностью. Это объясняется отсутствием низко лежащих уровней возбуждения у молекулы водорода. К тому же водород взрывоопасен, что ограничивает круг его использования. Это особенно актуально для импульсного реактора, поскольку он ~ в 40 раз более чувствителен к изменению геометрии, чем реакторы стационарного действия.

Метан оказывается более эффективным для замедления нейтронов потому что его молекула имеет низко лежащие вращательные (ротационные) уровни. Это, наряду с большой плотностью ядер водорода, делает метан по нейтронно-физическим свойствам наилучшим из всех до сих пор известных веществ. Выход холодных нейтронов из твердого метана при температуре 20 К в 2-3 раза выше, чем из водорода. Метан также удобен тем, что может быть использован в сравнительно широком интервале температур. Главный же недостаток метана – низкая радиационная стойкость. В процессе работы метанового замедлителя на ИБР-2 по 2-3 раза в сутки необходимо менять температурный режим (для «выгонки» накопившегося водорода), что вызывает нестабильность нейтронного спектра [6]. Кроме того, ресурс работы метанового замедлителя невелик из-за накопления в камере смол – твердых продуктов радиолиза.

Применение альтернативных материалов может оказаться более целесообразным нежели метана или водорода, но большинство из этих материалов также как и метан страдают слабой радиационной стойкостью.

Из радиационных эффектов при облучении замороженных водородсодержащих газов и жидкостей при температурах 20–100 К наиболее существенны следующие четыре:

- Образование радиолитического водорода; при отогреве расширяющийся газ водорода вызывает «распухание» твердой матрицы вещества замедлителя, которая может деформировать или даже разрушить металлические стенки камеры замедлителя [7, 8].
- Образование «замороженных» радикалов; при достижении их критической концентрации происходят реакции рекомбинаций с выделением тепла, что изменяет спектр нейтронов [9, 10];
- Образование высокомолекулярных, высококипящих продуктов, которые трудно удалить из камеры холодных замедлителей и которые могут накопиться в значительных количествах [2].
- Снижение теплопроводности [11].

Применение новых веществ в холодных замедлителях нейтронов приводит к необходимости создания библиотек сечений взаимодействия этих веществ с нейтронами при низких температурах для дальнейшего их использования в моделировании и расчете источников нейтронов с криогенными замедлителями. В связи со сложностью динамики взаимодействия медленных нейтронов с веществом при низких температурах, приготовление таких библиотек является не тривиальной задачей для решения которой существует несколько методик [12–14]. Чтобы быть уверенными, что созданные библиотеки адекватно описывают динамику взаимодействия молекул вещества с нейтронами, необходима их верификация путем сопоставления результатов экспериментов с результатами расчетов при использовании модели экспериментальной установки и библиотек верифицируемых материалов.

Цели и задачи исследования

Целью диссертационной работы является оптимизация комплекса замедлителей нейтронов реактора ИБР-2М. Указанная цель достигается решением следующих основных задач:

Первая задача состоит в том чтобы в результате экспериментального анализа найти наиболее радиационностойкие материалы среди эффективных замедляющих нейтроны материалов (т.е. получить значения интенсивности накопления радикалов и водорода в материалах для холодных замедлителей нейтронов; температур, при которых возможна работа с материалами без появления спонтанных реакций рекомбинаций; оценить температуры при которых водород начинает выходить из материала после облучения). Вторая задача - описав 3D геометрию реактора ИБР-2М и окружения в формате необходимом для расчета транспорта нейтронов программой MCNP (Monte Carlo N-particles transport), сравнить наиболее эффективные толщины для разных материалов и дать ответ о том, какой материал наиболее подходящий для использования в холодных замедлителях реактора ИБР-2М с учетом радиационных эффектов. Третья задача - расчетным путем провести оптимизацию конфигурации холодных и тепловых замедлителей нейтронов реактора ИБР-2М с целью удовлетворения требований к спектрам нейтронов и получения наиболее интенсивных потоков нейтронов для исследовательских каналов №№ 1, 2, 4-11.

Научная новизна результатов исследований

- Впервые получены результаты исследования скоростей накопления энергии и величины накопленной энергии в зависимости от полученной дозы в льде и ароматических углеводородах при низких температурах под облучением гамма квантами и быстрыми нейтронами.
- Впервые определена зависимость температуры инициации реакций рекомбинаций радикалов в метане в зависимости от полученной дозы.
- Впервые исследованы скорости накопления и температуры выхода радиолитического водорода из льда и ароматических углеводородов при

низких температурах под облучением гамма квантами и быстрыми нейтронами.

- Впервые получена динамика изменения теплопроводности льда при низких температурах под облучением гамма квантами и быстрыми нейтронами.
- Расчетным путем найдена наиболее эффективная толщина для нескольких материалов холодных замедлителей ИБР-2М.
- Доказана эффективность использования пост-замедлителя в виде водяного отражателя определенной конфигурации.
- Оптимизирована геометрия и композиция замедлителей реактора ИБР-2М удовлетворяющая требованиям экспериментов на выведенных пучках по интенсивности и спектру нейтронов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Условия эффективного использования различных материалов для криогенных замедлителей нейтронов для интенсивных источников.
2. Обоснование использования ароматических углеводородов для криогенных замедлителей реактора ИБР-2М.
3. Результаты оптимизации геометрии и композиции замедлителей для условий реактора ИБР-2М.

Практическая ценность

Результаты оптимизации конфигурации комплекса замедлителей реактора ИБР-2М используются при проектировании данного комплекса, что позволяет получить выигрыш в интегральной плотности потока холодных нейтронов для некоторых исследовательских пучков до 25 раз по сравнению с использованием плоских водяных замедлителей комнатной температуры.

Апробация работы

Результаты исследований докладывались на 6-м Международном совещании по перспективным холодным замедлителям АСОМ-6 (Юлих, Германия, 2002); 10-м Симпозиуме по радиационной химии "Tihany" (Сопрон, Венгрия, 2002); на Совместной летней школе ОИЯИ – Румыния по использованию нейтронов (охрана окружающей среды, физика конденсированных сред, ядерная физика) (Бая Маре, Румыния, 2002), на 16-ом Совещании международной коллаборации по современным источникам нейтронов ICANS-XVI (Дюссельдорф-Нойс, Германия, 2003); на четвертом Международном рабочем совещании «Ультрахолодные и холодные нейтроны. Физика & Источники» (С.Петербург, Россия, 2003); на 11-ой Конференции по физической химии (Тимишоара, Румыния, 2003); IX-ой Конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ (Дубна, 2005); на 17-ом Совещании международной коллаборации по современным источникам нейтронов ICANS-XVII (Нью Мексико, США, 2005); на X-ой Конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ (Дубна, 2006), на семинарах НЭОФКС ЛНФ, ОИЯИ; Института Ядерной Физики (ИКР) г. Юлих (Германия), Университета Хоккайдо, г. Саппоро, Япония; лаборатории Резерфорд-Апплтон (Оксфордшир, Великобритания).

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 97 страницах и включает 54 рисунка, 5 таблиц и список литературы, содержащий 57 наименований.

Публикации

Результаты работ, выполненных по теме диссертации, опубликованы в 9 статьях, список которых приведен в конце автореферата.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность поставленной задачи, формулируются цель и научная новизна проводимых исследований. Приведен краткий обзор содержания глав диссертации, представлены положения, выносимые на защиту и перечень печатных работ, в которых отражены основные результаты проведенных исследований.

В первой главе идет речь о проблемах, возникающих при использовании водородсодержащих материалов в высокоинтенсивных радиационных полях, а также о некоторых полученных экспериментальным путем величинах, связанных с данными проблемами. Глава состоит из трех частей.

В первой части приводится описание облучательной установки УРАМ-2, предназначенной для исследований радиационных эффектов в материалах холодных замедлителей (рис. 1). Установка позволяет проводить эксперименты с водородсодержащими веществами такими как метан, вода, ароматические углеводороды и др. при температурах от 20К до 100К за счет системы охлаждения организованной на основе гелия.

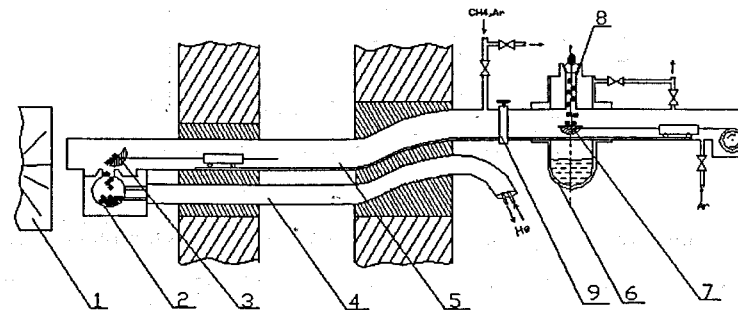


Рис. 1. Концептуальная схема облучательной установки УРАМ-2. ((1) реактор ИБР-2; (2) облучательная капсула; (3) подвижная чаша с тележкой в позиции облучения; (4) гелиевый трубопровод; (5) вакуумированный транспортный путь; (6) азотный криостат; (7) подвижная чаша с тележкой в позиции для загрузки; (8) трубка для загрузки с пробкой; (9) вакуумный шибер)

Поток быстрых нейтронов в позиции облучения составляет 3×10^{12} н/см²/с. Мощность поглощенной дозы в позиции облучения за счет гамма-излучения ~ 20 Гр/сек; для воды за счет нейтронов составляет ~ 90 Гр/сек.

Вторая часть посвящена описанию различных методик, которые были использованы для анализа данных экспериментов.

В третьей части приводятся результаты экспериментов, проведенных на УРАМ-2. В них наблюдались экзотермические реакции рекомбинации радикалов, посредством регистрации температур, в результате как инициированного посредством подогрева вещества начала этих реакций, так и спонтанного их возникновения при накоплении критической концентрации радикалов. Спонтанные реакции зарегистрированы в метане и в льде, причем в льде они наблюдались впервые (рис. 2).

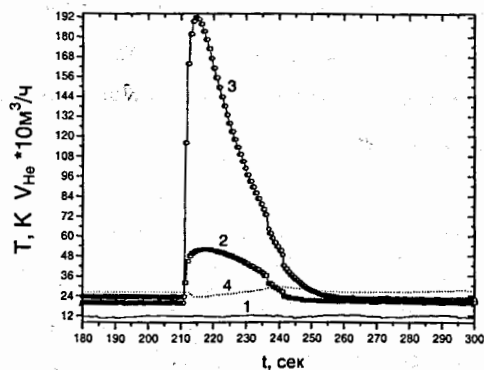


Рис.2. Показания температур и расхода гелия во время спонтанной реакции рекомбинации радикалов в льде (1-температура гелия на входе в теплообменник капсулы, 2- температура стенок капсулы, 3- температура внутри образца 4 – показания расхода гелия)

Одним из важных результатов работы является тот факт, что в мезитилене и смесях ароматических углеводородов ни спонтанных ни индуцированных реакций рекомбинации не наблюдалось. Основываясь на полученных из результатов экспериментов данных можно привести рекомендованные

температуры для работы с разными материалами чтобы избежать спонтанных реакций рекомбинаций, а также температуры при которых водород начинает выходить из материала после облучения (Табл.1).

Таблица 1

Материал	Накопление водорода и температура его выхода из материала	Рабочая температура, К
Метан	$6 \cdot 10^{-7}$ моль/Дж, T=70К	>28-30
Вода	$3.4 \cdot 10^{-8}$ моль/Дж	>40
Мезитилен	$3.9 \cdot 10^{-8}$ моль/Дж; T=130К	>15

Вторая глава посвящена вопросам термализации нейтронов. В ней проводится анализ максимально возможного выигрыша в потоке холодных нейтронов при использовании криогенных замедлителей нейтронов вместо замедлителей на основе воды комнатной температуры. В идеальном случае получен выигрыш равный ~ 60. Также представлены данные о том, что температура спектра нейтронов отличается от температуры среды, поскольку не происходит полная термализация и поэтому выигрыш от использования холодных замедлителей в реальных условиях эксплуатации будет несколько ниже, чем в идеальном случае.

Во второй части рассматриваются теоретические модели, которые были использованы при создании доступных для использования библиотек сечений взаимодействий нейтронов с веществом при энергиях нейтронов <4эВ. Учет эффектов химических связей в молекулах вещества особенно важен при проведении расчетов с материалами холодных замедлителей поскольку оказывает сильное влияние на замедление нейтронов до более низких энергий.

Далее проводится сравнение результатов расчетов полученных методом Монте Карло для материалов холодных замедлителей водорода и метана. В расчетах менялись только входные параметры относительно используемой библиотеки сечений для данного материала, без изменения остальной входной информации: геометрии, температуры и т.д. Сравнение показало достаточно

хорошую согласованность в результатах, что может говорить о надежности используемых библиотек.

Третья глава посвящена оптимизации комплекса замедлителей реактора ИБР-2М. Расчетная работа выполнялась с помощью программы MCNP и с учетом полученных в экспериментах по радиационной стойкости и при сравнении библиотек сечений данных.

В первой части проводится поиск наиболее эффективных толщин для нескольких материалов одного из холодных замедлителей реактора ИБР-2М. В результате получено, что хотя метан лучше чем мезитилен, водород и лед, тем не менее из-за радиационных эффектов в метане, накладывающих ряд ограничений на его использование, мезитилен становится фаворитом для использования в криогенных замедлителях ИБР-2М (рис. 3).

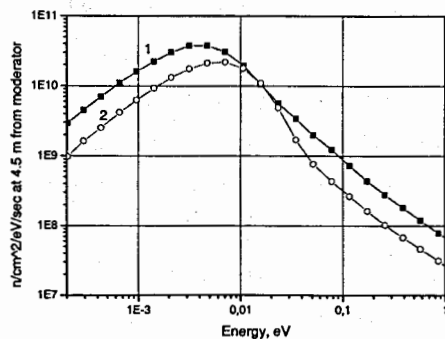


Рис. 3. Сравнение спектров нейтронов из замедлителей на основе метана и мезитилена при мощности реактора ИБР-2М равной 2МВт с учетом радиационных эффектов (1- мезитилен при $T=20\text{K}$ и толщине предзамедлителя 5см, 2 - метан при 60K и толщине предзамедлителя 9см)

Во второй и третьей частях проводится оптимизация комплекса замедлителей для каналов №№ 1, 2, 4-11, с учетом требований по спектрам нейтронов для этих каналов: для каналов №№ 1, 2, 4-6, 8 – спектр нейтронов

должен быть как можно более «холодным», для 7-го и 10-го каналов – смешанным и для 11-го канала – тепловым.

Для решения поставленной задачи использовались три криогенных замедлителя расположенные ортогонально каналам №№ 2, 5, 8 и оптимизация их размещения по отношению к постзамедлителям и замедлителям для соседних каналов. Для 11-го канала был использован замедлитель в виде крыла ортогональный данному каналу (рис. 4).

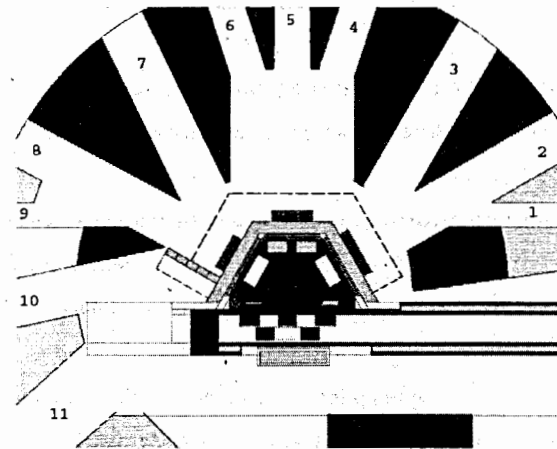


Рис. 4. Горизонтальное сечение 3D геометрия ИБР-2М и окружения по отметке 6.0м реактора. Цифры на рисунке соответствуют обозначению нейтральных каналов. Постзамедлители показаны условно.

При оптимизации комплекса замедлителей были использованы все известные на данный момент варианты увеличения плотности потока нейтронов: предзамедлители, криогенные замедлители, постзамедлители в виде холодных гребенчатых бериллиевых фильтров, эффект нейтронной пушки.

Выигрыш, получаемый при использовании криогенных замедлителей и эффекта постзамедлителей по отношению к воде комнатной температуры без бериллиевого фильтра, приведен на рисунке 5.

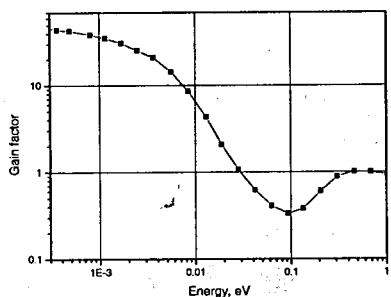


Рис. 5. Выигрыш от использования криогенного замедлителя по отношению к воде комнатной температуры в зависимости от энергии нейтронов.

Для всех исследовательских каналов приводятся величины выигрыша в интегральной плотности потока нейтронов, при использовании комплекса замедлителей, для этих каналов по сравнению с использованием воды комнатной температуры (Табл. 2). Использование бериллиевых фильтров при температуре 77К дает дополнительное увеличение плотности потока холодных нейтронов ~ в 1.5 раза, но появляется так называемый «бериллиевый край».

Таблица 2

№ Канала	1	2	4-6	7	
Энергия	<5мэВ	<5мэВ	<5мэВ	<5мэВ	<25мэВ
Выигрыш	19.1	18.7	25.1	4.3	1.5

№ Канала	8	9	10	11	
Энергия	<5мэВ	<5мэВ	<5мэВ	<25мэВ	<25мэВ
Выигрыш	23.4	19.1	3.8	1.8	2.8

Дифференциальные спектры нейтронов получены для каждого из каналов с относительными статистическими ошибками в расчетах менее 5%.

Спектры нейтронов имеют сходную форму для каналов №№ 1, 9, 4-6, 8, поскольку для них был необходим как можно более холодный спектр (Рис. 6), разница заключается лишь в абсолютной интенсивности. То же самое можно сказать для каналов №7 и №10 (Рис.7). Для канала №11 представлен тепловой дифференциальный спектр нейтронов (Рис.8).

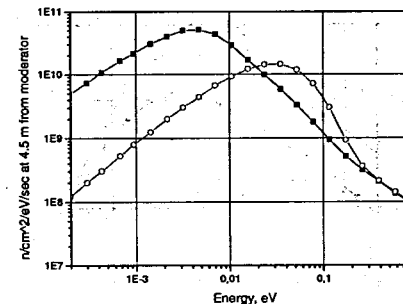


Рис. 6. Дифференциальные спектры нейтронов для канала №2 при мощности реактора 2МВт с использованием замедлителя на основе воды комнатной температуры - окружности и криогенного замедлителя - квадраты. Размеры и расположение замедлителей одинаковые.

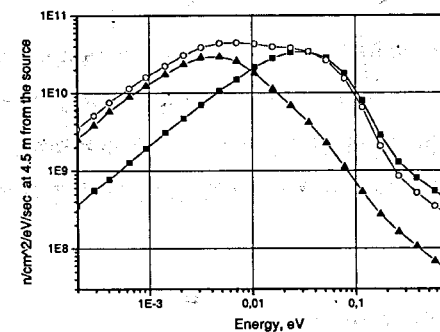


Рис. 7. Дифференциальные спектры нейтронов для 7-го канала при мощности реактора 2МВт (квадраты – только предзамедлитель, окружности - оптимальная конфигурация замедлителей (холодный+гребенчатый тепловой), треугольники – спектр полученный только с холодной части с учетом частичного затенения гребнями водяного замедлителя).

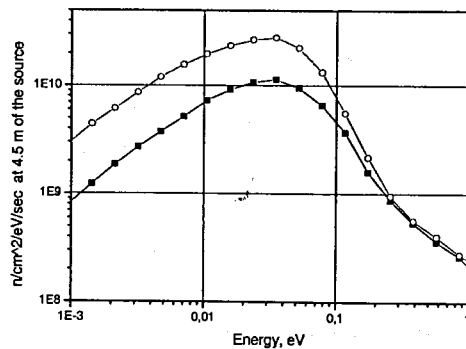


Рис. 8. Дифференциальные спектры нейтронов для 11-го канала при мощности реактора 2МВт (квадраты – только предзамедлитель, окружности наличие оптимальной конфигурации замедлителей)

В последней части приводятся результаты расчетов тепловыделения в криогенных замедлителях за счет гамма квантов и нейтронов для нескольких толщин предзамедлителей, которые оказывают существенное влияние на эти величины. Результаты расчетов для одного из криогенных замедлителей (канал №5) приведены в таблице 3.

Таблица 3

Толщина водяного предзамедлителя	3 см	4 см	5 см
Тепловыделение в мезитиле, вызванное нейтронами [Вт/г]	0.105	0.08	0.062
Тепловыделение в мезитиле, вызванное гамма квантами [Вт/г]	0.059	0.058	0.056
Суммарное тепловыделение в мезитиле [Вт/г]	0.164	0.138	0.118
Тепловыделение в алюминии, вызванное нейтронами [Вт/г]	0.003	0.002	0.002
Тепловыделение в алюминии, вызванное гамма квантами [Вт/г]	0.05	0.049	0.048

Суммарное тепловыделение в алюминии [Вт/г]	0.053	0.051	0.05
Тепловыделение в холодном замедлителе [Вт]	~218	~194	~176

В заключении подведены итоги диссертационной работы и сформулированы основные результаты.

Основные результаты, полученные в ходе исследований по теме диссертационной работы:

- Получены данные о скоростях накопления энергии и величинах накопленной энергии в зависимости от полученной дозы, а также о скоростях накопления и температуры выхода радиолитического водорода из льда и ароматических углеводородов при низких температурах под облучением гамма квантами и быстрыми нейтронами.
- Впервые определена зависимость между температурой инициации реакций рекомбинаций радикалов в метане. Зависимость имеет линейный характер от полученной дозы.
- Получена динамика изменения теплопроводности льда при низких температурах под облучением гамма квантами и быстрыми нейтронами (при дозе ~ 4МГр теплопроводность льда изменяется с 40 Вт/м/К до 0.4 Вт/м/К).
- Расчетным путем найдена наиболее эффективная толщина для нескольких материалов холодных замедлителей ИБР-2М. С учетом нейтронных характеристик и радиационной стойкости, сделан вывод о том, что мезитилен является наиболее эффективным материалом для использования в криогенных замедлителях реактора ИБР-2М. Его использование дает увеличение интегральной плотности потока холодных нейтронов на некоторых направлениях до 25 раз по сравнению с использованием водяных плоских замедлителей.
- Показана эффективность использования пост-замедлителя в виде водяного отражателя определенной конфигурации.

- Предложена и подтверждена расчетным путем наиболее эффективная геометрия и конфигурация размещения замедлителей реактора ИБР-2М, удовлетворяющая требованиям экспериментов на выведенных пучках по интенсивности и спектру нейтронов.

Результаты исследований, представленные в диссертации, опубликованы в следующих работах:

1. E.Shabalin, V. Golikov, E. Kulagin, S. Kulikov, V. Melikhov. Study of fast neutron radiation effects in cold moderator materials. *Particles and Nuclei, Letters*. 2002. No.5[114], 82-88
2. E. Shabalin, E. Kulagin, S. Kulikov, V. Melikhov. Experimental study of spontaneous release of accumulated energy in irradiated ices. *Radiation Physics and Chemistry*. Volume 67, Issues 3-4, 2003, 315-319
3. E. Kulagin, S. Kulikov, V. Melikhov, E. Shabalin Radiation Effects In Cold Moderator Materials: Experimental Study of Accumulation and Release of Chemical Energy. *Nuclear Instr. and Methods in Physics Research, B*. 2004, Vol 215/1-2, 181-186
4. E. Shabalin, S. Kulikov, V. Melikhov, E. Kulagin, Some Radiation Effects In Cold Moderator Materials, Experimental Study. In: *Proceedings of 16th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources*, May 12 – 15, 2003, Düsseldorf-Neuss, Germany. Edit. G. Mank, H. Conrad, Vol. II, p 911 – 919
5. K.N. Nunighoff, Ch. Pohl, V. Bollini, H. Conrad, D. Filges, F.Goldenbaum, S. Koulikov, et al. Ice moderator experiments at very low temperatures, *Eur. Phys. J. A* 22, 519-528 (2004)
6. Е.П. Шабалин, Е.Н. Кулагин, С.А. Куликов, В.В. Мелихов Радиационные эксперименты с водородсодержащими материалами на криогенной облучательной установке УРАМ-2 реактора ИБР-2. *Атомная Энергия т. 97*, вып. 3, (сентябрь 2004) стр. 183-189

7. Е.П. Шабалин, С.А. Куликов Холодный замедлитель нейтронов на основе ароматических углеводородов, *Сообщения ОИЯИ*, Е13-2004-73 (2004)
8. И.М. Баранов, И.И. Воронин, В.Г. Ермилов, Е.Н. Кулагин, С.А. Куликов, В.В. Мелихов, Р.Г. Пушкарь, Ро Ду Мин, Д.Е. Шабалин, Е.П. Шабалин, Изучение процесса выхода радиолитического водорода из экспериментального элемента холодного замедлителя на твердом мезитиле, *Сообщения ОИЯИ*, Р3-2004-212 (2004)
9. С.А. Куликов, Е.П. Шабалин, Сравнение эффективности материалов холодных замедлителей нейтронов для реактора ИБР-2М, *Сообщения ОИЯИ*, Р17-2005-222 (2005)

Цитируемая литература

1. G.Muhrer, E.J.Pitcher, and G.J.Russell, The neutron performance of a pre-moderated beryllium reflector-filter hydrogen moderator system for the Manuel Jr. Lujan Neutron Science Center // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 2005, N536, P. 154-164.
2. J.Carpenter, Cold moderator for pulsed neutron sources, *Proc.of Intern.Workshop on Cold Neutron Sources*, LANSCE, Los-Alamos, USA, 1990, P. 131-153.
3. M.G.Zemlyanov, Propane cold neutron source: creation and operation experience, *Proc. of the International workshop on cold moderators for pulsed neutron sources*, 1997, P. 87-96.
4. T.Grosz, L.Cser, L.Rosta, M.Szalok, and G.Zsigmond, Cold neutron source at the Budapest reactor // *Physica B*, 1992, N180-181, P. 932-934.
5. T.Grosz, V.A.Mityukhlyayev, L.Rosta, A.P.Serebrov, and A.A.Zaharov, Liquid hydrogen cold moderator optimisation at the Budapest Research Reactor // *Physica B*, 1997, N234-236, P. 1194-1195.
6. A.A.Belyakov, Solid methane cold moderator at the IBR-2 reactor // *Journal of Neutron Research*, 1996, N3, P. 209-221.

7. E.P.Shabalín, A.A.Belyakov, V.G.Ermilov, and V.V.Melikhov, Solid methane cold moderator at the IBR-2 reactor: test operation at 2 MW, Proc.of PANS-II, the Second International Meeting on Pulsed Advanced Neutron Sources, JINR Communication, D3-95-169, Dubna, 14-6-1995
8. T.L.Scott, J.M.Carpenter, and M.E.Miller, The Development of Solid Methane Neutron Moderators at the Intense Pulsed Neutron Source Facility of Argonne National Laboratory, Proc.of the International Workshop on Cold Moderators for Pulsed Neutron Sources, ANL, Argonne, Illinois, 29-9-1998, P. 299-304.
9. J.Carpenter, Thermally activated release of stored chemical energy in cryogenic media // Nature, 1998, P. 358-360.
10. E.Kulagin, S.Kulikov, V.Melikhov, and E.P.Shabalín, Radiation Effects In Cold Moderator Materials: Experimental Study of Accumulation and Release of Chemical Energy // Nuclear Instr.and Methods in Physics Research, B., 2004, N215/1-2, P. 181-186.
11. R.D.Taylor and J.E.Kilpatrick, // The Journal of Chem.Physics, 1955, N23, P. 1232-1235.
12. J.R.Granada, V.H.Gillete, and S.Petriw, Neutron cross section of cryogenic materials: A synthetic kernels for molecular solids, Proc: ACoM-6, FZJ, FZJ, Juelich, Germany, 11-9-2002
13. R.E.MacFarlane, Cold moderator scattering kernel methods, Proceedings of X-th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources, LANL, USA, 7-10-1988, P. 157-178.
14. W.Bernnat, J.Keinert, and M.Mattes, Evaluation of scattering laws and cross sections for calculation of production and transport of cold and ultracold neutrons, Proc: ACoM-6, FZJ, FZJ, Juelich, Germany, 11-9-2002

Получено 24 марта 2006 г.