

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета Д 720.001.06
в Международной межправительственной организации
Объединенный институт ядерных исследований

№246 от 19 января 2018 года

Присутствовали:

Председатель совета:	Оганесян Ю.Ц.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Зам. председателя совета:	Аксенов В.Л.	доктор физ-мат. наук	01.04.07
Ученый секретарь совета:	Попеко А.Г.	кандидат физ-мат. наук	01.04.16

Члены совета:

Авдеев М.В.	доктор физ-мат. наук	01.04.07
Апель П.Ю.	доктор хим. наук	01.04.01
Балагуров А.М.	доктор физ-мат. наук	01.04.07
Белушкин А.В.	доктор физ.-мат. наук	01.04.07
Гикал Б.Н.	доктор тех. наук	01.04.01
Гледенов Ю.М.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Головков М.С.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Джолос Р.В.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Дмитриев С.Н.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Изосимов И.Н.	доктор физ-мат. наук	01.04.01
Иткис М.Г.	доктор физ-мат. наук	01.04.01
Пенионжкевич Ю.Э.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Плакида Н.М.	доктор физ.-мат. наук	01.04.07
Реутов В.Ф.	доктор физ-мат. наук	01.04.07
Скуратов В.А.	доктор физ-мат. наук	01.04.01
Тер-Акопьян Г.М.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Утенков В.К.	доктор физ-мат. наук	01.04.01
Шабалин Е.П.	доктор физ.-мат. наук	01.04.01

Оганесян Ю.Ц.: Рассматриваем защиту диссертации Куликова Сергея Александровича, «Холодные замедлители нейтронов на основе твердых дисперсных водородсодержащих материалов» на соискание ученой степени доктора физико-математических

наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики. Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики.

Официальные оппоненты: Григорьев Сергей Валентинович, доктор физико-математических наук, заместитель директора по международной деятельности ФГБУ "Петербургский институт ядерной физики" НИЦ " Курчатовский институт", Несвижевский Валерий Викторович, доктор физико-математических наук, постоянный научный сотрудник Института Лауэ-Ланжевена, Гренобль, Франция, Межов-Деглин Леонид Павлович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук

Присутствует 21 из 25 членов совета, в том числе 7 докторов наук по профилю диссертации. Предоставляю слово ученому секретарю для оглашения личного дела соискателя.

Попеко А.Г.: Оппоненты присутствуют. Соискатель Куликов Сергей Александрович родился в 1977 году. В 2000 году окончил Тульский государственный университет. В 2006 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидат физико-математических наук в нашем диссертационном совете Д720.001.06. Все необходимые документы соискателем представлены, размещены на официальном интернет портале диссертационного совета, автореферат разослан, диссертация и автореферат представлены в библиотеке ОИЯИ

Оганесян Ю.Ц.: Я прошу Виктора Лазаревича Аксёнова быть председателем на заседании, тематика диссертации ему ближе и ему будет легче организовать дискуссию.

Аксёнов В.Л.: Слово предоставляется соискателю. Пожалуйста, Сергей Александрович, Вам даётся 40 минут.

Куликов С.А. : Уважаемый Председатель, уважаемые члены диссертационного совета, коллеги! Вашему вниманию представляется работа «Холодные замедлители нейтронов на основе твердых дисперсных водородсодержащих материалов».

Новые технологии в промышленности и медицине требуют создания новых материалов, а также исследования их характеристик на микро - и наноскопическом уровнях.

По мере развития методов конструирования и создания необходимых материалов, изучаемые структуры становятся все более сложными, а размеры приближаются к атомным. Это относится к материалам и их комбинациям из всех классов – от металлов, полупроводников и керамик до органических и биологических соединений. Поэтому для того чтобы управлять подобными сложными системами, необходимо детально изучать их химическую, электронную и магнитную структуры. Одним из эффективных, а в ряде случаев единственным экспериментальным методом является метод рассеяния нейтронов низких энергий.

В современных источниках нейтронов, таких как ядерные реакторы и источники нейтронов на основе ускорителей (spallation), образуются высокоэнергетические - "быстрые" нейтроны с энергией $\sim 2,5$ МэВ и выше. Для проведения экспериментов по изучению конденсированных сред, полученные от первичных источников нейтроны необходимо предварительно замедлить, т.е. уменьшить энергию на несколько порядков - до энергий эВ-диапазона ("тепловые" нейтроны, $\sim 0,025$ эВ, длина волны - единицы Ангстрем) и до энергий < 5 мэВ ("холодные" нейтроны, с длиной волны от 4 до 30 Å). Снижение энергии быстрых нейтронов источника вплоть до их термализации осуществляется в замедлителях нейтронов, которые являются промежуточным звеном между источником нейтронов и экспериментальными установками.

Создание нужного спектра нейтронов во внешних пучках выполняется в тепловых и в холодных замедлителях, работающих при температуре замедляющего материала 20К÷100К. Сочетание теплового и холодного замедлителей дает возможность более гибко подходить к проектированию, созданию и модернизации спектрометров и эффективнее использовать нейтроны.

Для достижения наибольшей интенсивности нейтронов на выведенных пучках, требования к спектру которых в отдельных случаях взаимоисключающие, необходимы детальная проработка конфигурации тепловой и холодных частей замедлителя с численным моделированием транспорта нейтронов и применение специальных технических решений. В настоящее время в России нет ни одного действующего источника холодных нейтронов (кроме описанного в данной работе), в то время как в мире работают более 15.

Одной из составных частей комбинированного замедлителя нейтронов является холодный замедлитель с температурой замедляющего вещества 20К÷100К. Разработка

эффективного и надежного холодного замедлителя нейтронов для высокоинтенсивных нейтронных источников является сложной инженерно-физической задачей. Она связана с рядом требований к водородсодержащим материалам при их использовании на импульсном реакторе. В частности, материалы должны обладать высокой радиационной стойкостью, широким диапазоном рабочих температур, высокой эффективностью по замедлению нейтронов до миллиэлектронвольтных энергий, высоким уровнем безопасности использования, технологичностью. Для выбранного материала должны быть разработаны и применены технологические решения по его загрузке в камеру замедлителя, охлаждению и извлечению из камеры.

На втором слайде представлены цели и задачи диссертации:

Цели:

1. Разработка нового направления в создании холодных замедлителей нейтронов на основе твердых дисперсных водородсодержащих материалов для высокоинтенсивных источников нейтронов.
2. Разработка метода получения медленных нейтронов в широком диапазоне длин волн для высокопоточных источников нейтронов с мультидисциплинарным набором экспериментальных установок для изучения конденсированных сред на выведенных пучках.

Задачи:

1. Детальное исследование водородсодержащих материалов для использования в холодных замедлителях нейтронов (на стендах и экспериментальных установках: УРАМ 2, 3 и 3М, ДИН-2ПИ, ОИЯИ; JESSICA FZ-Juelich, Germany). Анализ полученных данных и выбор материала, наиболее подходящего для холодного замедлителя ИЯУ ИБР-2 по совокупности следующих параметров: замедляющая способность, радиационная стойкость, возможность работать в широком диапазоне температур, а также безопасность и технологичность.
2. Разработка способа и технологии загрузки предложенного в данной работе материала в камеру холодного замедлителя при низких температурах через биологическую защиту (на примере ИЯУ ИБР-2).

3. Разработка и создание вне радиационной зоны полномасштабного экспериментального стенда холодного замедлителя с технологическими системами и системой контроля основных параметров с целью:
 - а) экспериментального исследования возможности технической реализации выбранного технологического решения по использованию материала для холодных замедлителей ИЯУ ИБР-2;
 - б) разработки и создания технологической системы и системы контроля основных параметров холодного замедлителя ИЯУ ИБР-2.
4. Разработка конфигурационного расположения и численное моделирование комбинированного замедлителя нейтронов для ИЯУ ИБР-2.
5. Создание и исследование основных свойств дисперсного водородсодержащего холодного замедлителя и комбинированного замедлителя нейтронов для выведенных пучков ИЯУ ИБР-2.
6. Исследование эффективности работы комбинированного замедлителя на примере нескольких спектрометров ИЯУ ИБР-2.

На следующем слайде приведены основные выносимые на защиту положения:

1. Разработка нового направления в создании холодных замедлителей нейтронов на основе твердых дисперсных водородсодержащих материалов для высокоинтенсивных источников нейтронов.
2. Результаты исследований радиационных эффектов в твердых водородсодержащих материалах при низких температурах (меньше 35 К), которые определяют условия их использования в холодных замедлителях интенсивных источников нейтронов, в частности:
 - методика определения и величины выделившейся энергии в спонтанных и индуцированных реакциях рекомбинаций радикалов в твердых водородсодержащих веществах после облучения быстрыми нейтронами;
 - определение предельной величины давления твердого метана на стенки камеры при облучении быстрыми нейтронами.
3. Обоснование применимости смеси мезитилена и м-ксилола в твердом состоянии в качестве замедляющего нейтроны материала холодного замедлителя в широком диапазоне температур от 25 до 150К.

4. Разработка и создание эффективного и безопасного источника холодных нейтронов на основе ароматических углеводородов для исследовательской ядерной установки ИБР-2.
5. Разработка и создание комбинированного замедлителя (с тепловой и холодной частями) - решение проблемы получения спектра нейтронов в широком диапазоне длин волн для источника нейтронов с мультидисциплинарным набором экспериментальных методик для изучения конденсированных сред на выведенных пучках нейтронов.

Далее представлены основные свойства, которыми должны обладать водородсодержащие материалы при низких температурах для их использования в холодных замедлителях, наиболее важные из которых:

- высокая плотность атомов водорода;
- стойкость к декомпозиции под действием радиации;
- наличие низколежащих уровней возбуждения молекул;
- большое сечения рассеяния и малое сечение поглощения;
- как можно более широкий рабочий диапазон температур;
- технологичность;
- достаточная теплопроводность при низких температурах для съема тепла, вносимого излучением;
- безопасность.

Основные материалы: жидкий водород, твердый метан, лед, мезитилен.

В замороженных водородсодержащих материалах под действием радиации накапливаются свободные радикалы и водород. Радикалы, при достижении их критической концентрации могут спонтанно рекомбинировать с выделением большого количества энергии и накопившейся водород может разрушить камеру замедлителя. На следующем слайде представлен разрушенный холодный замедлитель установки IPNS, США. Для изучения радиационных эффектов были разработаны и созданы облучательные установки УРАМ-2, 3, 3М на ИЯУ ИБР-2 ЛНФ и микротроне в Лаборатории ядер-

ных реакций ОИЯИ. На данных установках получены результаты по изучению радиационных эффектов в твердых водородсодержащих материалах для холодных замедлителей (метане, льде, мезитилене и его смеси с толуолом, гидратах метана и тетрагидрофурана) при низких температурах при облучении быстрыми нейтронами, гамма квантами и электронами на созданных для этих целей.

Установка УРАМ-2 и ее модификация УРАМ-3М располагались на 3-м канале реактора ИБР-2. Установки монтировались на подвижной платформе, на которой головную часть на время эксперимента устанавливали вплотную к замедлителю реактора. Поток быстрых нейтронов в позиции облучения составлял $2 \times 10^{12} \text{ н/см}^2/\text{с}$. Мощность поглощенной дозы в позиции облучения за счет гамма-излучения $\sim 20 \text{ Гр/сек}$, для воды за счет нейтронов составлял $\sim 90 \text{ Гр/сек}$. Представлена схема установки. Установка УРАМ-2, позволяла проводить эксперименты с водородсодержащими веществами (метан, вода, ароматические углеводороды и др.) по изучению процессов выделения энергии в результате экзотермических реакций рекомбинации радикалов и выхода радиолитического водорода при температурах от 20К до 100К. Полость внутри капсулы имела полусферическую форму. В нее загружались материалы в виде полусферы с заморозкой из жидкой фазы, а также посредством доставки шариков льда, приготовленных заранее, либо намораживались из газовой фазы на стенки. Стенки капсулы были сделаны из чистой бескислородной меди (М1 чистоты по ГОСТ России, теплопроводность 1000 Вт/м/К при 20К). Площадь внутренней поверхности капсулы составляла 22 см^2 , объем полости капсулы равен 12 см^3 .

В проведенных экспериментах посредством регистрации температур наблюдались выделения энергии в результате экзотермических реакций рекомбинаций радикалов. Реакции инициировались незначительным (на несколько градусов) подогревом вещества, либо спонтанно, при накоплении критической концентрации радикалов. Спонтанные реакции были зарегистрированы в метане, во льде, в гидратах метана и тетрагидрофурана, причем в исследованных материалах, за исключением метана, они наблюдались впервые. Индуцированные реакции рекомбинаций наблюдались во всех исследованных материалах.

Радиационные эффекты в ароматических углеводородах (мезитилене в нескольких фазовых состояниях и смеси мезитилена с толуолом) проявились значительно слабее, чем в других изученных материалах. Спонтанные реакции рекомбинаций не

наблюдались ни в одном из экспериментов. Очень слабая экзотермическая реакция рекомбинации зафиксирована после 45 часов облучения дозой ~ 20 МГр. Отсутствие спонтанных реакций рекомбинаций может быть объяснено относительно малой величиной накопленной энергии < 1 Дж/г ($< 0,02\%$ поглощенной дозы). Еще меньшее накопление радикалов и водорода наблюдалось в смеси мезитилена и м-ксилола.

Установка УРАМ-3М являлась модификацией установки УРАМ-2 и предназначалась для определения давления метана на стенки камеры, которое возникает при его отогреве после облучения. Модифицированная головная часть установки (рисунок 5) состояла из цилиндрической камеры диаметром 35 мм и толщиной 15 мм, заполненной алюминиевой «губкой» с открытыми порами размером 2-4 мм. Две плоские стенки камеры толщиной 1,5 мм и диаметром 50 мм служили мембранами, которые перемещались под давлением радиолитического водорода во время отогрева после облучения. Перемещение фиксировалось заранее откалиброванными индукционными датчиками. Камера с индукционными датчиками давления и термопарами находилась в вакуумной кожухе. Установка позволяла непрерывно работать при температуре метана 25-35 К в течение двух суток.

В результате экспериментов получено, что для дозы > 20 МГр при нагревании пиковое значение давления на мембраны, с учетом поправки на диаметр, достигает максимума $\sim 2,7$ МПа (смещение мембраны 0,4 мм соответственно), а затем падает, поскольку резко начинает выходить накопленный радиолитический водород, вне зависимости от скорости нагрева (рисунок 6). Эта величина давления является предельной. Давление на мембрану всегда достигает пикового значения при температуре в диапазоне 72-79 К (после длительного облучения), до этого момента только около 20% накопленного водорода выходит в газовый объем.

Целью экспериментальных работ с мезитиленом и его смесью с m-ксилолом на установке УРАМ-3, которая была установлена на микротроне МТ-25 в ЛЯР, являлось определение давления на оболочку экспериментальной цилиндрической камеры (твэл) при ее отогреве после облучения при температурах жидкого азота. Исследуемыми образцами, которыми заполнялся твэл, были чистый мезитилен и его смесь (в отношении 3:1) с м-ксилолом. Давление на оболочку твэла может создаваться как от температурного расширения замороженного образца, так и (что и является главной целью) от накопленного в процессе облучения водорода. При повышении температуры в образце

давление водорода увеличивается и передается на оболочку твэла вследствие «распухания» образца. Для определения величины давления на стенки твэла были установлены 4 кольцевых тензорезистора. Для равномерного облучения цилиндрического образца с высотой 105 мм пучком электронов с диаметром ~ 15 мм, твэл перемещался вверх и вниз перпендикулярно пучку в криостате с жидким азотом.

Энергия электронов в пучке ускорителя «МТ-25» – 9,5 МэВ, а ток пучка электронов изменялся в каждом цикле измерений от 2,5 до 6,2 мкА.

В результате экспериментов получены данные по давлению на стенки твэла и динамике выхода водорода после облучения образцов при варьировании температуры, материала образца и времени облучения (дозы). Один из результатов по облучению мезитилена в течении 7,72 часа при токе пучка электронов 4,4 - 4,6 мкА.

Основываясь на результатах экспериментов, полученных на установках УРАМ-2, УРАМ-3 и УРАМ-3М, можно рекомендовать рабочие температуры для использования водородосодержащих материалов в качестве замедлителей нейтронов, которые позволяют избежать возникновения спонтанных реакций рекомбинаций радикалов. В той же таблице приведены полученные данные о величине накопления радиолитического водорода и температуре, при которой он способен выходить из материала в газовый объем, скорость накопления энергии от поглощенной дозы, максимальное давление на стенки облучательной камеры, наличие или отсутствие спонтанных реакций рекомбинаций радикалов.

Отсутствие спонтанных реакций рекомбинаций радикалов и низкий уровень накопления энергии в мезитилене и его смеси с м-ксилолом, а также малая по сравнению с твердым метаном скорость накопления водорода, позволяют рассматривать его как наиболее подходящий с точки зрения радиационной стойкости твердый водородосодержащий материал для холодных замедлителей нейтронов. Вместе с тем, следует учитывать, что в мезитилене при длительном облучении возникают сопоставимые с твердым метаном давления на стенки камеры, в которой он облучается и необходимо предусмотреть либо свободное пространство между слоями/кусочками мезитилена для его расширения, либо делать камеры замедлителей способными выдержать соответствующие давления.

Полученные результаты по давлению метана на стенки камеры нашли свое при-

менение при проектировании холодного замедлителя для источника холодных нейтронов на основе твердого метана для TS-2 ISIS (Rutherford Appleton Laboratory, UK).

Далее переходим к результатам экспериментов, в которых сравнивались интенсивности выхода холодных нейтронов из замедлителей на основе разных водородсодержащих материалов (лед, метан, гидрат метана, водород, мезитилен) при низких температурах (20-30 К), а также результаты проверки библиотек с сечениями рассеяния нейтронов для водородсодержащих материалов при низких температурах, необходимых для моделирования спектра холодного замедлителя нейтронов. Эксперименты выполнены на установке JESSICA в FZJ (Juelich).

Наилучший результат по выходу холодных нейтронов дал твердый метан. Из анализа спектров видно, что мезитилен (фаза III) показывает схожий спектр с жидким водородом. В диапазоне энергий от 20 мэВ до 1 эВ мезитилен превосходит жидкий водород по выходу нейтронов. Дополнительное увеличение выхода нейтронов может быть достигнуто с использованием II-ой фазы мезитилена.

С помощью библиотек данных нейтронных сечений для мезитилена и программы MCNP был смоделирован эксперимент на установке JESSICA. Сравнения экспериментальных данных с расчетными для нейтронов с энергией ниже 10 мэВ дают удовлетворительные результаты. Расчеты также показали, что при использовании мезитилена (фаза II) интенсивность нейтронов с энергией, близкой к 1 мэВ, была бы выше примерно на 30 - 40%.

Результаты, полученные на спектрометре HEPA ИЯУ ИБР-2, демонстрируют трудности получения фазы II (аморфная фаза), которая не является стабильной и со временем переходит в фазу I и III. Другой, найденный из экспериментов на спектрометре HEPA, способ получения аморфной фазы – это использование смеси мезитилена и м-ксилола. Эксперименты на спектрометре неупругого рассеяния ДИН-2ПИ ИЯУ ИБР-2 по исследованию влияния температуры на выход холодных нейтронов для мезитилена подтвердили возможность увеличения выхода холодных нейтронов: при понижении температуры с 30 К до 20 К можно увеличить выход холодных нейтронов на 20 - 25 %.

Проведенные расчеты для одного из комбинированных замедлителей модернизированной ИЯУ ИБР-2 методом Монте-Карло с помощью программы MCNP при опти-

мальной толщине и криогенных температурах нескольких водородсодержащих материалов показали, что выход холодных нейтронов из метана по сравнению с мезитиленом, водородом и льдом при одинаковой температуре, выше.

Вместе с тем, с учетом радиационных эффектов в твердом метане, приводящих к необходимости увеличения толщины предзамедлителя для снижения радиационной нагрузки, и увеличения температуры до 60 К во избежание спонтанных реакций рекомбинаций, мезитилен, при оптимальных параметрах, дает более чем в 2 раза больший выход холодных нейтронов.

Данный результат, вместе с результатами исследований радиационной стойкости и неупругого рассеяния нейтронов, позволил сделать выбор в пользу мезитилена во втором фазовом состоянии (или смеси мезитилена с м-ксилолом) в качестве материала для использования в холодных дисперсных замедлителях нейтронов комплекса комбинированных замедлителей ИЯУ ИБР-2. Разработанная концепция комплекса комбинированных замедлителей ИЯУ ИБР-2 состоит из тепловых и холодных частей.

Далее были определены параметры для формирования спектров нейтронов с заданными требованиями для шести спектрометров ИЯУ ИБР-2, расположенных на выведенных пучках 7, 8, 10 и 11. В процессе оптимизации, было принято решение разместить холодный замедлитель в нижней части активной зоны (высота активной зоны 44 см) до отметки 6,0 (центр активной зоны реактора), а верхние 22 см занять гребенчатым водяным замедлителем для формирования теплового спектра нейтронов (создать комбинированный замедлитель). Таким образом, оси нейтронотводов спектрометров, которым необходим холодный спектр смещаются ниже отметки 6,0, а для спектрометров с необходимым смешанным спектром нейтронов остаются на центре активной зоны реактора, тогда они получают и тепловые нейтроны от гребенчатого водяного замедлителя и холодные нейтроны от холодного замедлителя. Вместе с тем, поскольку модернизированная активная зона реактора стала более компактной, то 11 пучок, нейтронотвод которого был настроен на предыдущую зону, практически не получал бы нейтроны. Поэтому для 11 канала, в верхней части замедлителя предусмотрен дополнительный гребенчатый водяной замедлитель в геометрии «крыло» ортогонально оси 11 пучка.

В качестве примера приведу рассчитанные спектры нейтронов для направления 7

пучка на расстоянии 4,5 м от поверхности замедлителя. Как видно из спектров, в зависимости от настройки нейтроновода 7-го пучка возможно одновременное получение и тепловых, и холодных нейтронов (комбинированный спектр нейтронов).

В результате моделирования рассчитан коэффициент увеличения потока холодных нейтронов из холодного замедлителя с мезитиленом по отношению к плоскому замедлителю с водой комнатной температуры в зависимости от длины волны нейтронов (до 13 раз). Далее на слайде представлены молекулы мезитилена и м-ксилола, а также температуры их плавления. Ввиду накопления водорода, было принято решение использовать материал с загрузкой в виде отдельных шариков.

Далее представлены результаты исследований, проведенных на полномасштабном испытательном стенде, которые экспериментально подтвердили возможность загрузки потоком газообразного гелия большого количества шариков в камеру замедлителя по сложному транспортному пути, повторяющему конфигурацию пневмотранспортной линии через биологическую защиту ИЯУ ИБР-2. В камере-имитаторе было установлено окно с тройным стеклом, которое позволило визуально наблюдать за загрузкой шариков в камеру. На установке были получены основные параметры для загрузки шариков, в том числе, что при температуре более 150 К шарики начинают слипаться.

Полученные данные позволили предложить и разработать конфигурацию комбинированного замедлителя для 7, 8, 10 и 11 пучков, которая обеспечивает необходимые спектры нейтронов для шести спектрометров, расположенных на этих пучках, за счет численно промоделированного оптимального расположения холодной и тепловой частей замедлителя. На основе данных, полученных на испытательном стенде была разработана технологическая система холодного замедлителя. На слайде представлена упрощенная схема.

В результате был разработан, создан и запущен в опытную эксплуатацию холодный дисперсный замедлитель на основе смеси мезитилена и м-ксилола в составе комбинированного замедлителя на ИЯУ ИБР-2. и исследовать его основные параметры. Проведен анализ результатов пуска холодного замедлителя (температуры, теплопритоки, спектры нейтронов, деградация спектра, анализ вязкости слитой после облучения смеси и др.).

Далее приводятся измеренные спектры нейтронов на спектрометрах, расположенных на 7, 8, 10 и 11 пучках, коэффициент увеличения потока холодных нейтронов при работе комбинированного замедлителя с холодным замедлителем в его составе. Из полученных спектров получен коэффициент выигрыша в потоке холодных нейтронов, который достигает 13 раз для длин волн 8 - 10 А.

Перейдем к некоторым результатам экспериментов по изучению конденсированных сред на спектрометрах с новым комбинированным замедлителем ИЯУ ИБР-2. Так, в частности, спектрометр НЕРА получил и холодные, и тепловые нейтроны. Выигрыш в холодной области за счет нового замедлителя и нейтронотода составил до 18 раз. Независимые измерения на рефлектометре ГРЕЙНС показали выигрыш в потоке холодных нейтронов ~ 10 раз.

Таким образом, начало работы комбинированного замедлителя нейтронов с холодным шариковым замедлителем в его составе на модернизированной исследовательской ядерной установке ИБР-2 обеспечило необходимые спектры нейтронов для шести действующих исследовательских установок (половина от всех введенных в эксплуатацию установок для изучения конденсированных сред на ИЯУ ИБР-2): СКАТ, ЭПСИЛОН, НЕРА, РЕМУР, ГРЕЙНС, ФСД, расположенных на 7, 8, 10 и 11 пучках. Таким образом, на установках СКАТ, ЭПСИЛОН, НЕРА, РЕМУР - появилась возможность одновременно работать как с тепловыми, так и с холодными нейтронами, установка ФСД обеспечена тепловыми нейтронами, а ГРЕЙНС – холодными нейтронами.

Выводы:

1. Разработано новое направление в создании холодных замедлителей нейтронов на основе твердых дисперсных водородсодержащих материалов для высокоинтенсивных источников нейтронов.
2. Детально исследованы замедляющая способность, радиационные эффекты, возможность работать в широком диапазоне температур твердых водородсодержащих материалов для холодных замедлителей при низких температурах (метана, льда, гидрата метана, мезитилена и его смеси с м-ксилолом) на разработанных и созданных облучательных установках УРАМ-2, 3 и 3М на реакторе ИБР-2 (ЛНФ ОИЯИ) и микротроне МТ-25 (ЛЯР ОИЯИ) и в экспериментах на установке JESSICA (FZ Juelich, Germany) и ДИН-2ПИ (ЛНФ ОИЯИ).

3. Установлено, что в смеси мезитилена и м-ксилола спонтанной реакции рекомбинаций радикалов не наблюдается, а скорость накопления энергии от поглощенной дозы наименьшая из всех исследованных материалов. Определено, что давление на стенки облучательных камер за счет накопленного радиолитического водорода в метане и в мезитилене достигает величины 2,7 МПа.
4. Разработан способ дисперсной загрузки смеси мезитилена и м-ксилола в виде шариков (диаметром 3,5 - 3,9 мм) в камеру холодного замедлителя при низких температурах потоком холодного газообразного гелия. На созданном полномасштабном экспериментальном стенде холодного замедлителя, повторяющем сложный транспортный путь через биологическую защиту ИЯУ ИБР-2, апробирован и детально исследован способ дисперсной загрузки большого количества шариков (~25000 штук). Созданы технологическая системы и системы контроля основных параметров холодного замедлителя ИЯУ ИБР-2.
5. Разработан и создан первый в мире холодный замедлитель на основе дисперсной не взрывоопасной смеси мезитилена и м-ксилола с контрольно-измерительным оборудованием и программным обеспечением. Экспериментально показано, что холодный замедлитель:
 - увеличивает поток холодных нейтронов до 13 раз;
 - может непрерывно работать на ИЯУ ИБР-2 при мощности 2 МВт без замены материала до 10 суток;
 - может работать в широком диапазоне температур от 30 до 150 К.
6. Разработан метод получения медленных нейтронов в широком диапазоне длин волн для высокопоточных источников нейтронов с мультидисциплинарным набором экспериментальных установок, предназначенных для изучения конденсированных сред на выведенных пучках. Апробация метода проведена на исследовательской ядерной установке ИБР-2 для 7, 8, 10 и 11 пучков, а именно: разработана конфигурация, сделано детальное численное моделирование, создан и внедрен комбинированный замедлитель нейтронов с холодным твердодисперсным замедлителем в его составе. Применение комбинированного замедлителя расширило

возможности проведения экспериментов на шести спектрометрах ИЯУ ИБР-2, размещенных на указанных пучках, и повысило эффективность исследований с холодным и смешанным (холодным и тепловым) спектром нейтронов.

Во всех работах, составляющих основу диссертации принимал непосредственное участие, а вклад является определяющим. В частности, принимал участие в разработке и создании концепции и технического решения комплекса комбинированных замедлителей нейтронов модернизированной ИЯУ ИБР-2 для изучения конденсированных сред на выведенных пучках. Мной лично проведено Монте-Карло моделирование комбинированных замедлителей нейтронов ИЯУ ИБР-2 и произведены расчеты тепловой нагрузки на холодные замедлители нейтронов. Полученные результаты легли в основу технического задания на проектирование комплекса замедлителей ИЯУ ИБР-2. Участвовал в экспериментах, численном моделировании, обработке и интерпретации экспериментальных данных по исследованию замедляющей способности различных материалов при варьировании температуры и апробации созданных библиотек с сечениями рассеяния нейтронов в водородсодержащих материалах при низких температурах на установке JESSICA (Германия); в постановке экспериментов, разработке и создании двух экспериментальных установок УРАМ на реакторе ИБР-2 и облучательной установки на микротроне МТ-25; проведении экспериментов, обработке и интерпретации данных по изучению радиационной стойкости водородсодержащих твердых материалов, перспективных для холодных замедлителей нейтронов. При моем непосредственном участии осуществлено проектирование основных узлов полномасштабного экспериментального стенда холодного замедлителя ИЯУ ИБР-2; разработаны и созданы системы контроля параметров и процесса загрузки шарикового холодного замедлителя; на ИЯУ ИБР-2 запущен в опытную эксплуатацию комбинированный замедлитель нейтронов с холодным шариковым замедлителем в его составе и исследованы его свойства. Принимал активное участие в международном сотрудничестве по проектам создания перспективных замедлителей нейтронов для высокоинтенсивных источников нейтронов.

Работа хорошо известна в мире. Докладывалась на более 30 международных конференциях, в частности на последних пяти профильных конференциях ICANS, которые

проводятся раз в два года. Была представлена на программно-консультативных комитетах в ОИЯИ и семинарах в лабораториях в мире.

По результатам сделано 48 публикаций, 22 из которых внесены в список рецензируемых журналов, индексируемых в системах Web of Science и SCOPUS, и рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ.

В заключение хотел бы поблагодарить большой коллектив, участвовавший в работах, как из нашего института, так и сторонних организаций, а также коллег из зарубежных институтов.

Благодарю вас за внимание!

Аксенов В.Л.: Спасибо. Пожалуйста, вопросы, замечания.

Пениожкевич Ю.Э. Вот известно, что в качестве твердого замедлителя всегда раньше использовался полиэтилен, например, для He3 счетчиков, которые регистрируют нейтроны. Там есть проблемы, время, замедление, рекомбинации радикалов, а вот если для счетчиков использовать мезителен и м-ксилол это что-то даст для времени срабатывания? Это несколько другая область не реактор, но тоже замедлитель используется.

Куликов С.А.: Совершенно верно, но как я в самом начале своего доклада сказал, для получения теплового спектра эффективной является обычная вода, для снижения энергии нейтронов с большой энергии до низкой, но, если вы хотите еще меньшие энергии (большие длины волн), тогда вы должны замораживать материал, тот же полиэтилен, чтобы получить холодные нейтроны. Для счетчиков достаточно и оправдано использование полиэтилена потому, что вы регистрируете тепловые нейтроны. Измеряемые потоки низкие поэтому радикалов не накапливается. Если вы приблизите его к реактору, то получите разрушение полиэтилена.

Оганесян Ю.Ц.: Скажите, а обычный лед разве нельзя использовать в качестве холодного замедлителя нейтронов? В чем его ограничение?

Куликов С.А.: Поскольку не только радикалы влияют на работу холодного замедлителя, но и накапливающийся водород, который не выходит из материала, а начинает создавать значительное давление на стенки при повышении температуры, то резкое увеличение температуры из-за реакций рекомбинаций радикалов приводит к увеличению давления на стенки и это может вызвать разрушение камеры замедлителя. Либо необходимо работать при более высокой температуре, но тогда значительно уменьшится выход холодных нейтронов.

Авдеев М.В.: Можно ли говорить, что, исходя из теоретических знаний и полученных результатов, сейчас есть понимание, как строить холодные замедлители для будущих источников? Может быть нужны еще какие-то усилия со стороны химиков?

Куликов С.А.: На данный момент если использовать смесь мезителена и м-ксилола с разработанной технологией, мы можем ее переносить на другие источники. Если на других источниках решат использовать другие материалы, то нужно будет проводить дополнительные исследования. Данная смесь - наиболее подходящая для применения из твердых водородсодержащих материалов. Мы знаем, что твердый метан - хороший замедляющий нейтроны материала, но он недостаточно хорош с точки зрения радиационных эффектов. Смесь мезитилена и м-ксилола хороша с обеих точек зрения и с замедляющей способности и с точки зрения радиационных эффектов, и вполне может применяться на различных источниках. В частности, мной недавно была рецензирована статья авторов из исследовательского центра Юлиха, где коллеги планируют использовать на новом источнике нейтронов, который они планируют создавать в Юлихе, смесь мезитилена и м-ксилола.

Тер-Акопьян Г.М.: Увеличение выхода холодных нейтронов по отношению к водяному в 13 раз. Вопрос, а раньше на сколько было увеличение потока холодных нейтронов в других замедлителях?

Куликов С.А. В нашей лаборатории в 90-х годах был создан метановый замедлитель и увеличение потока холодных нейтронов было до 20 раз. Но основная проблема с ним была в том, что он мог на эксперимент работать всего несколько часов и работать с ним было почти невозможно. В результате, после короткого времени эксплуатации от него отказались.

Тер-Акопьян Г.М.: А жидкий водород дает увеличение в какое количество раз?

Куликов С.А.: Жидкий водород дает приблизительно такое же увеличение в потоке холодных нейтронов. Сейчас в мире активно развиваются исследования по использованию параводорода. У него отличается сечение рассеяния, но проблема с ним в том, что замедлитель должен быть значительно толще и при появлении до 10 % орто-составляющей, выход холодных нейтронов уменьшится на ~40 %. В высоких радиационных полях это вполне может случиться даже при использовании катализаторов.

Гледенов Ю.М. Правильно ли я понимаю, что если использовать данный замедлитель

для источника нейтронов большей мощности будет ограничение по времени работы?

Куликов С.А.: Для более мощных источников, с большими потоками, ограничение будет заключаться в том, что мы видели, что после облучения, слитый материал после расплавления имеет большую вязкость. Это дает некоторое ограничение по времени работы в цикле, но с помощью техники, которую мы уже испытали и дальнейшего развития направления – это непрерывная смена материала или квази-непрерывное с постепенной заменой материала в течение нескольких часов. С помощью данной техники с шариками это вполне возможно.

Аксёнов В.Л.: Спасибо большое, Сергей Александрович. Теперь секретарь огласит отзыв организации, в которой выполнялась работа и отзыв ведущей организации.

Попеко А.Г.: Имеется заключение НТС Лаборатории нейтронной физики в которой выполнялась данная работа. Оно положительное и замечаний не содержит. Заключение ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт ядерных исследований Российской академии наук утверждено Директором Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт ядерных исследований Российской академии наук членом корреспондентом РАН Л.В. Кравчуком. Заключение положительное, есть два замечания:

- в отдельных местах диссертации автор слишком углубляется в технические подробности работы;
- на нескольких приведенных в диссертации рисунках не все элементы обозначены и приходится искать о них упоминание в тексте.

Вместе с тем, изложенные замечания не снижают научной ценности и значимости работы. Диссертация соответствует требованиям ВАК к докторским диссертациям.

Аксенов В.Л.: Готовы ли Вы ответить на замечания?

Куликов С.А.: Согласен с замечаниями. Можно было бы более подробно указать на схемах все элементы, но, в тоже время это могло бы их перегрузить информацией.

Аксенов В.Л.: Предоставляется слово оппоненту С.В. Григорьеву.

Григорьев С.В.: Оглашает отзыв. Текст прилагается.

Аксенов В.Л.: Спасибо, Сергей Александрович, прошу ответить на вопросы.

Ответ на первый вопрос по поводу графика, который стремится к нулю.

Куликов С.А.: Согласен с замечанием. Необходимо было более строго написать, что при температуре большей или равной 29 К. Мы наблюдали падение в 4 раза уже при

29 К.

Григорьев С.В.: Второе замечание. На стр. 69 впервые показано, что «под действием излучения наблюдалось ухудшение теплопроводности льда» в 10 раз, однако не обсуждается причина этого явления. Есть ли какие-либо мысли по этому поводу?

Куликов С.А.: Мысли у нас были. Мы это явление наблюдали и скорее всего оно связано с повреждениями, которые возникают в материале под облучением. Из данных литературы известно, что за теплоперенос отвечает водород. В результате повреждений ему, скорее всего, сложнее перескакивать, но это только предположение. Процесс сложный и его детальное изучение не являлось предметом изучения данной работы.

Григорьев С.В.: В подписи к рис.71, стр.119, есть вводящее в заблуждение пояснение, что представлены спектры «...с учетом радиационных повреждений». На самом деле, текст раздела поясняет, в чем дело, но присутствует некоторая непродуманность формулировки. Но смысл заключается в том, что необходимо более четко сформулировать.

Куликов С.А.: Да, согласен. Подпись пытался написать таким образом, чтобы сразу было легче понять, о чем идет речь.

Аксенов В.Л.: На стр. 85 показано, что скорость выхода водорода имеет пик при $T=69$ К и экспоненциальный скачок при $T=79$ К (Рис. 50). Автор не указал, в чем причина этих явлений? Оппонент говорит, что плавление метана ожидается при $T>90$ К: почему водород входит при температурах явно ниже температуры плавления? Вы можете это не объяснять, но может быть у Вас есть какое-то объяснение?

Куликов С.А.: Объяснение следующее. При определенной температуре мы видим, что давление на стенки камеры увеличивается за счет расширения материала, и, видимо, он растрескиваясь дает возможность части водорода выходить. После того как давление сбрасывается, а материал возвращается к прежним размерам водород уже выходит с повышением температуры по стандартному закону Аррениусу.

Григорьев С.В.: К общим замечаниям следует отнести следующие: Титул главы 4 не совсем соответствует содержанию главы: заявленная в титуле «концепция комбинированного замедлителя» уже изложена ранее в главе 3. Следовало озаглавить главу 4, например, «Комплекс комбинированных замедлителей на реакторе ИБР-2 для пучков 7, 8, 10, 11: конструктивные особенности, исследование свойств».

Куликов С.А.: Да, можно было и так назвать.

Григорьев С.В.: Не указана температура плавления шариков смеси мезитилена и м-

ксилола. Не указано, как эта температура меняется с ростом вязкости смеси после облучения.

Куликов С.А.: Температуру мы знаем 227 К – температура плавления, но после облучения может быть несколько иначе. Мы конечно же брали пробу и за тем измеряли температуру плавления, но это не совсем тоже самое. Поскольку при первом расплавлении после облучения проходит ряд реакций, но даже в этой облученной смеси температура плавления не сильно отличалась от исходной.

Григорьев С.В.: Ну и наконец последнее. В работе не обсуждается вопрос насколько плотно упакованы шарики смеси мезитилена и м-ксилола при их попадании в холодный замедлитель.

Куликов С.А.: На самом деле в одном месте это указывается, но, наверное, следовало более четко это прописать в общей таблице с характеристиками и размерами холодного замедлителя. 0,6 – это плотность заполнения и то, что предлагает Сергей Валентинович, мы это делаем после каждого цикла работы. Мы измеряем количество слитой смеси.

Аксенов В.Л.: Сергей Валентинович, Вы удовлетворены ответами?

Григорьев С.В.: Да, полностью удовлетворен. В целом работа прекрасная и соответствует требованиям ВАК к докторским диссертациям. Диссертация меня впечатлила, она актуальна и достоверность не подвергается сомнению.

Аксенов В.Л.: Ю.Э. Пенионжкевич, у Вас возник дополнительный вопрос?

Ю.Э. Пенионжкевич: Не совсем понятно зачем использовать шарики если достаточно увеличить плотность? Все это сжать.

Куликов С.А.: Шарики мы используем по двум причинам. Во-первых, чтобы была свобода для расширения (свободное пространство) при выходе водорода чтобы материала не давил на стенки камеры и ее не разрушил. Во-вторых, площадь поверхности большая и съём тепла, вносимого излучением с них лучше.

Аксенов В.Л.: Спасибо. Второй оппонент - Валерий Викторович Несвижевский.

Несвижевский В.В.: Оглашает отзыв. Текст прилагается.

Аксенов В.Л.: Спасибо. Пожалуйста, Сергей Александрович, ответьте.

Куликов С.А.: Следует сказать, что мы работали уже с имеющимися установками, но в процессе модернизации мы использовали знания и оптимизировали замедлитель уже под новые установки. Когда мы только начинали, были обозначены потребности для

существовавших приборов. И, в частности, для седьмого канала мы оптимизировали полностью геометрию вместе с нейтроноводной системой, замедлителем, то, что получается на образце, под потребности прибора. К сожалению, не для всех приборов это делалось, но для 10 канала, на котором расположен рефлектометр, он оптимизировался уже с учетом того, что есть холодный замедлитель.

Несвижевский В.В.: Второе замечание, в некотором противоречии, что выбран мезитилен, хотя написано, что замедляет лучше метан.

Куликов С.А.: В докладе мной говорилось, что метан замедляет лучше, но с учетом радиационных повреждений и в наших условиях работы на реакторе при существующих технологиях, метан использовать невозможно. В тоже время в качестве развития мной показано, что если сделать шарики из метана и их менять в замедлителе, то тогда этот замедлитель будет лучше. Мы сейчас работаем над техникой непрерывной смены материала в замедлителе.

Несвижевский В.В.: Спасибо. Мне работа очень понравилась, и я считаю, что автор С.А. Куликов безусловно достоин присуждения степени доктор физико-математических наук.

Аксенов В.Л.: Третий оппонент Леонид Павлович Межов-Деглин доктор физико-математических наук, Главный научный сотрудник Института физики твердого тела Российской академии наук.

Межов-Деглин Л.П.: Оглашает отзыв. Текст прилагается.

Куликов С.А.: Согласен с замечанием оппонента. Хочу сказать, что мы исследовали клатрат метана, но проблемы были теми же. Радиационные повреждения и использовать из-за них его не представляется возможным.

Межов-Деглин Л.П.: Диссертация произвела хорошее впечатление. Результат высокий, а диссертация по всем параметрам соответствует требованиям ВАК к докторским диссертациям. Ее автор С.А. Куликов достоин присуждения степени доктор-физико-математических наук по указанной специальности.

Аксенов В.Л.: Спасибо. Исчерпывающие ответы оппонентами получены, они ими удовлетворены. Общая дискуссия. Выступления.

Шабалин Е.П.: В качестве дискуссии с Леонидом Павловичем я хотел бы сказать о некой аналогии между метаном и мезитиленом. И в первом, и во втором случае при

температуре около 60 К начинает выходить водород. При той же температуре достигается максимальное давление на сосуд (около 30 атмосфер), причина, скорее всего одна – разрушение под действием давления водорода, который и шарики разрушает, и метан разрушает.

Над проблемой создания эффективных замедлителей в мире работают уже более 80-ти лет после того, как Бруно Максимович Понтекорво в 1934 году открыл замедление нейтронов в воде. То, что эта работа идёт так долго, говорит о её исключительной сложности. Я скажу несколько слов о проблеме холодных замедлителей. Фактически, все эти работы, завершением которых является диссертация Сергея Куликова начались в лаборатории давно. Еще в восьмидесятых годах. Все, кто участвовал в них, прошли все стадии: жидкий водород, метан и мы видели их недостатки. Цикл радиационных исследований, о которых докладывал Сергей Александрович, был сделан в результате всего мирового опыта, однако изучением этих эффектов никто не занимался.

Эти исследования были сделаны в нашей лаборатории под руководством Сергея Александровича. Это было сделано целенаправленно, для совершенствования замедлителей реактора ИБР-2М. Сергею Александровичу повезло, что он подключился к работе на этапе начала этих радиационных экспериментов, прошел со всеми весь путь: проведение экспериментов, обработка данных, интерпретация результатов, создание действующего замедлителя. Я считаю, что Сергей Александрович достоин присуждения ему степени доктора физико-математических наук.

Аксенов В.Л.: Если больше никто не желает высказаться, то дискуссия прекращается. Она была короткой, но это и понятно, поскольку работу все не раз слышали и сегодняшний доклад был подробный и обстоятельный. Озвучены глубокие отзывы оппонентов и оппонировавшей организацией. Я бы хотел кратко подвести итог нашего заседания. Мы видим, что выполнено основательное – фундаментальное исследование. Я бы хотел подчеркнуть, что работа носит сильно выраженный междисциплинарный характер. Здесь переплетаются самые разные науки: физика реакторов, физика конденсированного состояния и хорошо, и важно, что оппоненты у нас разного и широкого профиля из разных институтов. Из самой диссертации следует ряд интересных физических задач по физике конденсированного состояния, здесь же физика низких температур. Вот такой комплекс физических задач и в тоже время - это комплексное фундаменталь-

ное исследование, где пересекаются разные области науки, вытекает совершенно конкретное и необходимое для дальнейшего развития нейтронных исследований приложения, которое реализовалось в физических установках и подтверждено их практическим использованием, их польза.

Есть ли еще у кого-то замечания? Замечаний нет. Спасибо всем, что так детально познакомились с работой. Предоставляю соискателю заключительное слово.

Куликов С.А.: Прежде всего я хотел бы поблагодарить членов диссертационного совета за внимание, а также оппонентов за очень высокую внешнюю оценку нашей работе. Большое спасибо! Я уверен, что эта работа принесет пользу не только Лаборатории нейтронной физики, но и Объединенному институту ядерных исследований. Работа получилась межлабораторной. Это вклад и Лаборатории физики высоких энергий, и Лаборатории ядерных реакций, и Лаборатории нейтронной физики. Мы с 18 лет плечом к плечу шли с Евгением Павловичем Шабалиным, который помогал, старался передать свои знания, свой опыт и здесь в России и в поездках. Всегда приятно на больших конференциях выходить и рассказывать об успехах всего нашего научного сообщества. Большое всем спасибо!

Аксенов В.Л.: Спасибо вам большое. Так, мы переходим к голосованию. Предлагаю выбрать счетную комиссию, для проведения тайного голосования для решения вопросов о соответствии рассматриваемой работы требованиям Положения и о присуждении ученой степени доктора физико-математических наук Куликову Сергею Александровичу: Гикал Б.Н., Гледенов Ю.М. Головков М.С.

ПОСТАНОВИЛИ: Избрать счетную комиссию в составе: Гикал Б.Н., Гледенов Ю.М. Головков М.С.

СЛУШАЛИ: Утверждение протокола счетной комиссии по проведению тайного голосования о присуждении ученой степени доктора физико-математических наук Куликову С.А.: состав совета утвержден в количестве 25 человек, присутствовали на заседании 21 член совета, среди них 7 докторов наук по профилю диссертации. Роздано бюллетеней - 21, осталось нерозданных – 4, оказалось в урне для голосования – 21, при этом с отметкой "за" - 21, подано с отметкой "против" - нет, недействительных бюллетеней - нет.

Аксенов В.Л.: Прошу утвердить протокол счетной комиссии. Протокол счетной комиссии утвержден единогласно. Таким образом, наш диссертационный совет принял

решение о присуждении ученой степени доктора физико-математических наук Куликову С.А. Переходим к обсуждению заключения совета по диссертации Куликова С.А. Проект заключения есть у всех членов совета. В проект включены основные положения и результаты, вынесенные на защиту. Если нет замечаний, прошу голосовать. Утверждено единогласно.

Дата оформления стенограммы: 24.01.2018

Председатель совета,
Академик РАН

Ученый секретарь
диссертационного Совета



Ю.Ц. Оганесян

А.Г. Попеко