

P13-2012-113

В. Д. Ананьев, А. А. Беляков, М. В. Булавин,  
А. Е. Верхоглядов, Е. Н. Кулагин, С. А. Куликов,  
А. А. Кустов, А. А. Любимцев, К. А. Мухин,  
Т. Б. Петухова, А. П. Сиротин, А. Н. Федоров,  
Е. П. Шабалин, Д. Е. Шабалин, В. К. Широков

**ПЕРВЫЙ В МИРЕ ШАРИКОВЫЙ  
ХОЛОДНЫЙ ЗАМЕДЛИТЕЛЬ НЕЙТРОНОВ**

Ананьев В. Д. и др.

P13-2012-113

Первый в мире шариковый холодный замедлитель нейтронов

10 июля 2012 г. впервые в мире холодные нейтроны генерировались в уникальном шариковом замедлителе нейтронов КЗ-202 реактора ИБР-2. В новом замедлителе используются твердые шарики замороженной смеси ароматических углеводородов — наиболее радиационно-стойких водородосодержащих веществ, к тому же хорошо термализующих нейтроны. С началом штатной работы КЗ-202, которое планируется в 2013 г., реактор ЛНФ выйдет в мировые лидеры импульсных источников для исследования веществ методом рассеяния нейтронов.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2012

Ananiev V. D. et al.

P13-2012-113

The World's First Pelletized Cold Neutron Moderator

In July 10, 2012 cold neutrons were generated for the first time with the unique pelletized neutron moderator CM-202 at the IBR-2 reactor. In this moderator, small spherical beads of solid mixture of aromatic hydrocarbons — benzene derivatives — are applied. Aromatic hydrocarbons are known as the most radiation-resistant hydrogenous substances and have properties to moderate slow neutrons effectively. After the start of routine operation of the new moderator CM-202, the IBR-2 research reactor of the Frank Laboratory of Neutron Physics will take world's leading position among pulsed neutron sources for investigation of matter with neutron scattering methods.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2012

## ВВЕДЕНИЕ (К ИСТОРИИ СОЗДАНИЯ)

Идея использования шариковых (pelletized) холодных замедлителей для высокоинтенсивных источников нейтронов возникла в середине 80-х гг. прошлого века. В первой из опубликованных концепций такого замедлителя предполагались шарики твердого метана [1, 2]. В те времена подобное предложение не могло быть реализовано из-за множества принципиальных технических трудностей и отсутствия необходимых экспериментальных данных. Не удалось получить обнадеживающих результатов при разработке твердометанового шарикового замедлителя и при проектировании европейского SNS [3, 4]. Да и сейчас еще остаются нерешенные проблемы с твердым метаном. При низкой температуре (20–30 К) твердый метан и другие алифатические углеводороды используются пока только в виде моноблочных (bulk) структур на низкопоточных источниках нейтронов [5–9]; при плотности потока быстрых нейтронов  $10^{11}$  см<sup>-2</sup>/с время непрерывной работы не превышает одной недели. Попытки использования твердометановых замедлителей на источниках средней мощности (таких как ИБР-2 или вторая мишень ISIS) из-за непродолжительного ресурса непрерывной стабильной работы — от 8 до 24 ч — нельзя считать удачными [10–13]. Та же проблема и с общим ресурсом замедлителя: вследствие накопления твердых продуктов радиолитического распада или из-за разрыва камеры замедлителя под давлением радиолитического водорода ресурс оказывался слишком недолговечным [14, 15]. Холодные же нейтроны требовались и в то время, и еще больше требуются в настоящее время, поскольку исследования смещаются в сторону наносистем, т. е. в диапазон длинноволновых нейтронов, а мощность источников нейтронов растет [16–18]. Две проблемы постоянно стоят перед создателями замедлителей холодных нейтронов для новых интенсивных импульсных источников нейтронов: преодоление нежелательных последствий радиолитического распада и низкая теплопроводность твердофазных материалов низкотемпературных замедлителей.

К началу XXI в. еще не было достаточной информации о поведении материалов, пригодных к использованию в качестве рабочего вещества холодного замедлителя нейтронов, в интенсивном потоке быстрых нейтронов источника (реактора, мишени ускорителя) порядка  $10^{12}$  см<sup>-2</sup>/с и выше. Кроме жидкого водорода, не страдающего от радиационных повреждений, остальные водородосодержащие вещества — это химические соединения, склонные к разного рода химическим реакциям под действием быстрых нейтронов (точнее, протонов отдачи). Некоторые из таких радиационных эффектов сильно ограничивают область использования холодных замедлителей.

Пробел в знаниях радиационных эффектов был восполнен исследованиями группы физиков Лаборатории нейтронной физики на радиационной криогенной облучательной установке реактора ИБР-2 [19]. В первую пятилетку текущего века на этой радиационной установке при поддержке, в

частности, руководителей проекта общеевропейского источника нейтронов ESS (который начал реализовываться только недавно в шведском наукограде Лунде) и проекта второй мишени источника ISIS были проведены обширные исследования влияния нейтронного облучения на разные материалы для холодных замедлителей нейтронов — до этого таких обширных данных не было (см., например, [20–23]). Удалось не только количественно уточнить многие эффекты, но и обнаружить ряд ранее не известных, очень принципиальных для практики явлений, два из которых могли бы быть классифицированы как открытия, если бы не отмена этой практики в России в 1992 г.: обнаружение спонтанного саморазогрева льда при его облучении быстрыми нейтронами при температуре ниже 50 К даже при сравнительно невысоких флюенсах  $10^{16}$  см<sup>-2</sup>, а также обнаружение необычно быстрого снижения теплопроводности низкотемпературного льда (в тридцать раз при флюенсе  $3 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup> и в сто раз (до насыщения) при  $3 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>). В результате этих исследований был выбран подходящий материал — ароматический углеводород мезитилен, производная бензола с тремя группами СН<sub>3</sub>, замещающими атомы водорода (рис.1).

Хотя мезитилен и ранее был известен как один из наиболее радиационно стойких водородосодержащих веществ [24] и использовался на слабых нейтронных источниках [25–28], экспериментальных количественных данных о его нейтронных и радиационных свойствах не было. В экспериментах на радиационной установке УРАМ-2 в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ было показано, что интенсивность образования радиолитического водорода в мезитиле в 20 раз ниже, чем в метане, а такой неприятный эффект, как быстрый радиационно-стимулированный спонтанный саморазогрев (a burp), ничтожно мал [18]. Иржи Натканец (ЛНФ) в результате изучения неупругого рассеяния медленных нейтронов на ароматических углеводородах при низких температурах [29, 30] предложил в качестве замедлителя использовать



Рис. 1. Молекула мезитилена. Белые шарики — атомы водорода, серые — углерода

смесь двух ароматических углеводородов — мезитилена и *m*-ксилола, которая имеет аморфную структуру и дает большой выход холодных нейтронов вследствие обогащения плотности низколежащих энергетических уровней молекул. В работе над будущим проектом шарикового холодного замедлителя помогла полученная проф. Р. Гранадой (Аргентина) библиотека нейтронных сечений мезитилена [31].

В конце 2005 г. был разработан эскизный проект будущего шарикового холодного замедлителя, основанный на нейтронно-физических расчетах по обоснованию оптимальной геометрии замедлителя, оценке тепловых режимов, обосновании целесообразности его использования, безопасности работы, реализуемости изготовления [32, 33]. В 2006 г. начались расчетно-исследовательские и конструкторские работы по проекту такого замедлителя. Они включали в себя: теоретические исследования транспорта шариков по трубам под действием холодного газа гелия, лабораторные исследования на физической модели пневмотрассы с полиэтиленовыми и стеклянными шариками, измерение фрикционных и прочностных свойств шариков мезитилена [34, 35], температуры размягчения, создание полуэмпирической математической модели движения одиночного шарика [36, 37], разработку метода генерации твердых шариков мезитилена и их доставки в камеру замедлителя, разработку принципиальной технологической схемы холодного мезитиленового замедлителя, геометрии и проекта реальной пневмотрассы по сложному пути существующих помещений реактора и, наконец, исследования на полномасштабной модели пневмотракта загрузки шариков в камеру замедлителя [38–40]. Эти работы были выполнены в ЛНФ ОИЯИ при участии НИКИЭТ и ЦАГИ им. профессора Н. Е. Жуковского. Главная часть шарикового холодного замедлителя — собственно камера — и откатная защита для установки и смены замедлителя у реактора были спроектированы в НИКИЭТ (Москва), а изготовлены в НПО «Атом» и в цеху опытно-экспериментального производства ЛНФ.

Прежде чем перейти к следующему разделу работы, следует остановиться на двух принципиальных моментах.

- Почему не выбран жидководородный замедлитель, который наиболее популярен на существующих нейтронных источниках?
- Почему выбран именно шариковый замедлитель?

Относительно водородного замедлителя. Существующие экспериментальные и расчетные данные позволяют утверждать, что по выходу холодных нейтронов твердый кристаллический мезитилен с температурой 20 К по крайней мере не уступает жидкому водороду [41, 42]. При этом исследования неупругого рассеяния медленных нейтронов на аморфных смесях ароматических углеводородов (мезитилена с *m*-ксилолом или псевдокумолем) показали, как было сказано выше, наличие в них низколежащих уровней возбуждения молекулы со значительной плотностью, что дает дополнительные преимуще-

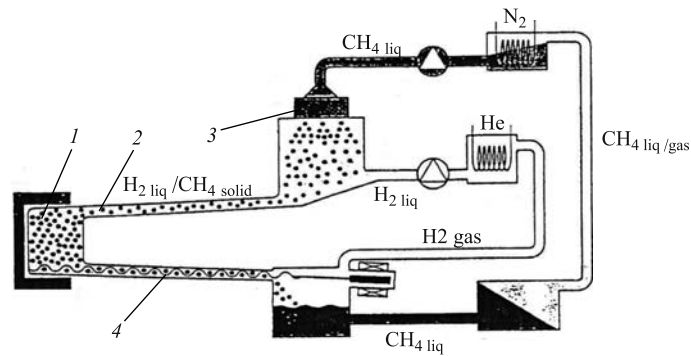


Рис. 2. Схема шарикового твердометанового замедлителя с непрерывной прокачкой шариков: 1 — камера замедлителя; 2 — тракт подачи свежих шариков из генератора шариков; 3, 4 — узлы удаления отработанных шариков, выполненные в виде шнека

щества ароматическим углеводородам по сравнению с жидким водородом в плане выхода холодных нейтронов. Помимо этого, может быть, не слишком существенного фактора, есть более веские основания для предпочтения мезитилена — это сложность и дороговизна создания и эксплуатации жидководородного источника вследствие необходимости избежать взрыва водорода. Политика высочайшей надежности работы потенциально опасных в радиационном плане установок предусматривает тройную оболочку жидководородного контура с гелиевой и вакуумными полостями. Это особенно важно при установке холодного замедлителя на импульсном реакторе, каким является ИБР-2. Изменение мощности импульсного реактора типа ИБР в случае деформации его частей при взрыве водорода будет в 40 раз (!) больше, чем в стационарном реакторе.

Что касается второго вопроса, шариковая (в общем случае — дисперсная) упаковка замедляющего вещества позволяет:

- избежать высокого давления радиолитического водорода в момент нагревания вещества перед очередной сменой материала [43];
- значительно снизить температуру замедлителя (теплопроводность всех водородосодержащих веществ, пригодных для использования в криогенных замедлителях нейтронов, очень низкая; у мезитилена — 0,2 Вт/м/К при 20 К);
- наладить непрерывную, сколь угодно долгую работу замедлителя путем периодической выгрузки-догрузки небольшой доли шариков (эскизная схема такого варианта шарикового замедлителя дана на рис. 2 [2]; в настоящее время такой замедлитель пока нигде не создан ввиду значительных технических проблем).

В общем, шариковый замедлитель на ароматических углеводородах сохраняет положительные свойства жидководородного замедлителя, оказываясь при этом значительно дешевле при создании и безопаснее при эксплуатации.

### 1. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ «ШАРИКОВЫЙ ХОЛОДНЫЙ ЗАМЕДЛИТЕЛЬ НЕЙТРОНОВ» НА РЕАКТОРЕ ИБР-2

Теперь непосредственно о конструкции и принципиальной схеме работы шарикового холодного замедлителя нейтронов на реакторе ИБР-2. Он является первым из запланированных трех холодных замедлителей и входит в комплекс замедлителей, установленных с одной из сторон шестигранного корпуса реактора за отражателем нейтронов. В состав комплекса (рис. 3), помимо шарикового холодного замедлителя, входят: водяной предзамедлитель,

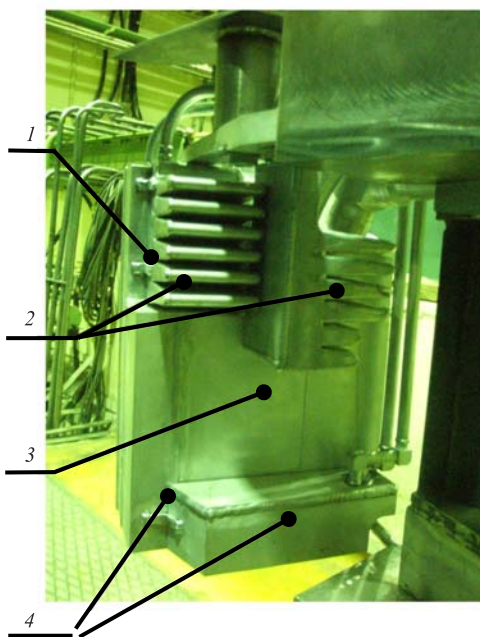


Рис. 3. Фото комплекса замедлителей нейтронов на реакторе ИБР-2М в направлении пучков № 7, 8, 10 и 11: 1 — водяной предзамедлитель; 2 — водяные гребенчатые замедлители; 3 — холодный замедлитель (видна только поверхность вакуумного кожуха); 4 — водяные постзамедлители

два водяных замедлителя гребенчатого типа и постзамедлители. Такой комбинированный замедлитель обеспечивает для всех спектрометров, расположенных на четырех пучках нейтронов с этой стороны реактора (7-й, 8-й, 10-й и 11-й пучки), требуемый оптимальный спектр холодных и тепловых нейтронов. Это — спектрометры текстурных исследований методом дифракции, рефлектометры поляризованных нейтронов, спектрометр неупругого рассеяния и др.

Камера шарикового холодного замедлителя, изготовленная из алюминиевого сплава АМГ, имеет внутренние размеры по фронту  $150 \times 200$  мм и толщину 40 мм. Учитывая коэффициент наполняемости камеры шариками 0,62, получаем эффективную толщину слоя замедляющего вещества 24–25 мм, которая является оптимальной для выхода холодных нейтронов с поверхности замедлителя при наличии водяного предзамедлителя толщиной 50 мм [44]. Тепловыделение в шариках твердой аморфной смеси мезитилена и *m*-ксилола от замедления нейтронов и поглощения гамма-квантов — 0,17 Вт/г, полная мощность тепловыделения в замедлителе (с учетом стенок камеры) достигает 160–170 Вт. Замедлитель охлаждается проходящим сверху вниз сквозь засыпку шариков холодным гелием от холодильной машины КГУ-700 с температурой 25–27 К, при этом средняя температура мезитилена в камере замедлителя при расходе охлаждающего гелия 6 г/с равна 32–34 К. Расчетный фактор выигрыша дифференциальной плотности потока холодных нейтронов в холодном замедлителе при 20 К по сравнению с традиционным для реактора ИБР-2 водяным замедлителем гребенчатого типа дан на рис. 4 [44].

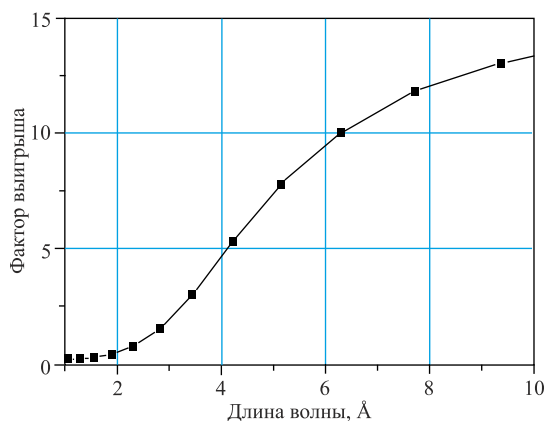


Рис. 4. Фактор выигрыша плотности потока холодных нейтронов мезитиленового замедлителя относительно водяного гребенчатого замедлителя (расчет Монте-Карло)



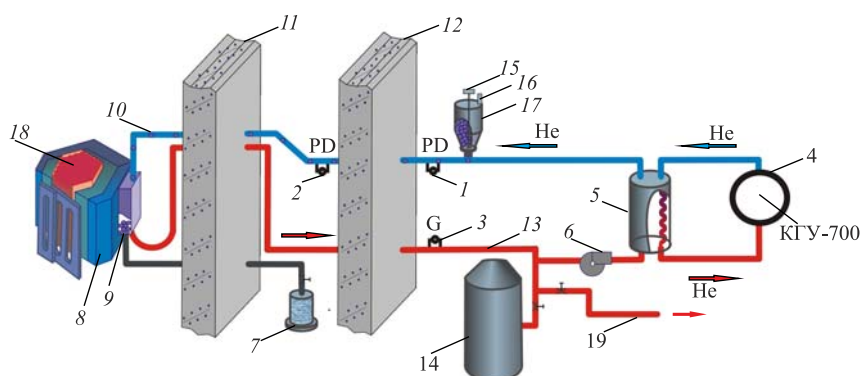


Рис. 5. Принципиальная технологическая схема кригенного замедлителя КЗ-202. Описание узлов и агрегатов дано в тексте, кроме 11, 12 — биологическая защита реактора; 14 — ресивер газообразного гелия; 19 — линия сброса радиолитического водорода в атмосферу при отогреве шариков

Принципиальная технологическая схема работы шарикового холодного замедлителя представлена на рис. 5. Загрузка шариков в камеру замедлителя (9) реактора ИБР-2 (18), расположенную за водяным предзамедлителем (8), в начале рабочего двухнедельного цикла реактора осуществляется по пневмотракту (10) потоком холодного гелия с температурой 80 К, расходом 1,5 г/с. Гелий прокачивается газодувкой (6) с измерением расхода газа трубкой Пито (3), а его низкая температура поддерживается теплообменником (5), на который подается гелий первого контура от холодильной машины КГУ-700 (4).

Твердые шарики смеси мезитилена и *m*-ксилола (их диаметр 3,5–3,9 мм) готовятся заранее на специальной установке и хранятся в жидком азоте. При загрузке они сыплются в дозатор (15–17) — электромеханическое устройство, обеспечивающее квазипериодический сброс шариков в пневмотракт, — небольшими порциями, в среднем по 2–4 шарика в секунду. Параметры транспортирующего гелия выбраны так, чтобы при движении шариков по сложной трассе длиной около 20 м с поворотами и крутыми подъемами, при большом числе соударений со стенками трубы сохранить их целостность и в то же время избежать заторов. Загрузка камеры (примерно 23000–24000 шариков) происходит за время около 4 ч. Слежение за движением шариков осуществляется измерением дифференциального статического давления газа с нескольких пар точек трассы дифманометрами PD (1, 2). На этапе пуска и исследований свойств замедлителя используется также визуализация нейтронного образа шариков, загружаемых в камеру, методом камеры-обскуры [45] в масштабе 1:2. Это позволяет не только видеть расположение шариков в

камере, но и снимать пространственное изменение энергетического спектра медленных нейтронов (используя метод времени пролета нейтронов) и, следовательно, распределение температуры замедляющего вещества. Особенно важно это в период отогрева и расплавления мезитилена после окончания рабочего цикла реактора и перед сливом жидкой смеси из камеры в сборную емкость (7). Поддержание низкой температуры шариков 30–35 К после загрузки осуществляется по тому же контуру (10, 13) при большем расходе гелия (до 6 г/с).

## **2. СТАТУС ШАРИКОВОГО ХОЛОДНОГО ЗАМЕДЛИТЕЛЯ НЕЙТРОНОВ КЗ-202. ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ ПУСКА ЗАМЕДЛИТЕЛЯ**

В период 2010–2011 гг. был проведен большой цикл исследований транспорта шариков твердого мезитилена — по сложному тракту от дозатора шариков до камеры замедлителя — на полномасштабном испытательном стенде, показавший работоспособность проекта и позволивший определить оптимальные параметры технологических систем при загрузке шариков (рис. 6) [38–40]. В конце февраля 2012 г. был закончен монтаж первого комплекса



Рис. 6. Полномасштабный технологический стенд криогенного замедлителя

замедлителей реактора ИБР-2 с холодным замедлителем, пред- и постзамедлителями и гребенчатыми водяными замедлителями, который в технической документации реактора фигурирует как КЗ-202, и всех технологических систем, необходимых для его пуска. Пуск КЗ-202 проводился в два этапа:

- физический пуск (работа установки без мощности реактора с загруженными шариками в камеру замедлителя и на малой мощности не выше 0,5 МВт, 25 % номинальной мощности);

- осуществление программы детальных исследований характеристик и ресурсных возможностей замедлителя на номинальной мощности реактора; одновременно на этом этапе проводились научные исследования на пучках холодных нейтронов от КЗ-202 на 5 из 14 спектрометров реактора ИБР-2.

Ввод в эксплуатацию планируется в 2013 г.

Физический пуск КЗ-202 был успешно проведен в апреле–июле 2012 г., а в сентябре–ноябре выполнялся второй этап пуска. Наиболее существенными из полученных результатов можно считать следующие:

- доказана на практике реальность быстрой (около 4 ч), без заторов и дефрагментации, загрузки шариков в камеру замедлителя (объем засыпки шариков — 1000 мл) и последующей выгрузки отработанного мезитилена путем его плавления с выходом практически 100 % загруженного материала;

- достигнута средняя температура шариков мезитилена в камере 30–32 К при номинальной мощности реактора 2 МВт;

- проверена надежность работы КИП в течение длительного времени, в том числе системы непрерывного контроля прохождения шариков по тракту подачи в камеру во время загрузки;

- доказана возможность непрерывной работы одной загрузки шариков при мощности реактора 2 МВт в течение 6–7 сут практически без снижения потока холодных нейтронов, без осаждения полимеров в камере замедлителя и в сбросной трубе;

- измерены нейтронно-физические характеристики КЗ-202, а именно энергетические спектры нейтронов при температурах замедлителя 100 и 30 К (см. рис. 7). Фактор выигрыша плотности потока холодных нейтронов по сравнению с плоским водяным замедлителем комнатной температуры оказался близок к расчетному, если учитывать более высокую температуру замедлителя, согласно выводам работ [46, 47]; расчет производился для 20 К. Измерение спектров нейтронов в режиме камеры-обскуры позволяло в то же время иметь одномерную развертку вида замедлителя и наблюдать изменение высоты засыпки шариков непосредственно в камере замедлителя по характеру спектра нейтронов (рис. 8).

Вместе с тем можно отметить повышенные теплопритоки на гелиевых трубопроводах — вдвое выше проектных (до 200 Вт), а также низкую холодопроизводительность криорефрижератора КГУ-700, что в итоге повлекло увеличение средней температуры замедлителя при работе на полной мощно-

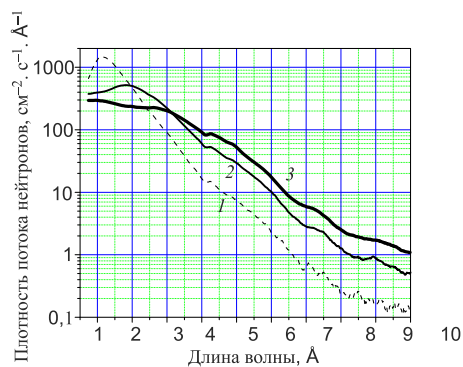


Рис. 7. Сравнение дифференциальной плотности потока нейтронов от предзамедлителя (кривая 1) и криогенного замедлителя реактора ИБР-2 при температуре 100 К (кривая 2) и 30 К (кривая 3)

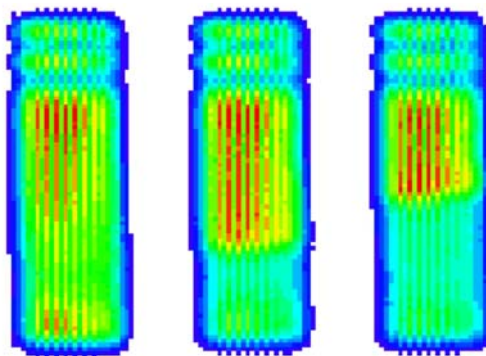


Рис. 8. Нейтронное изображение части комплекса замедлителей КЗ-202 с криогенным замедлителем, расположенным в нижней половине, при разном уровне заполнения шариками: пустая камера (слева), заполненная на 2/3 (в центре) и полная (справа)

сти реактора до 32–35 К (вместо ожидаемых 20–24 К по проекту) и, соответственно, снижение выхода холодных нейтронов. Низкая температура в камере замедлителя может быть достигнута путем замены КГУ-700 на более эффективный холодильный агрегат с параметрами порядка 1000 Вт при 15 К.

В настоящее время КЗ-202 готовят к опытной эксплуатации. Также ведутся исследования возможности увеличения длительности непрерывного цикла работы шарикового холодного замедлителя сверх семи суток.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные по спектру холодных нейтронов, полученные во время физического пуска КЗ-202, вместе с ранее измеренными значениями плотности потока нейтронов на поверхности плоских водяных замедлителей реактора ИБР-2 [48] позволяют подтвердить проектные ожидания и сравнить ожидаемые характеристики КЗ-202 при мощности реактора 2 МВт с позиционируемым как лучший в настоящее время импульсным источником SNS (Ок-Ридж, США) (см. таблицу).

### Интенсивности холодных нейтронов (с длиной волны $> 4 \text{ \AA}$ )

Параметр	КЗ-202	SNS [49]
Поток с поверхности замедлителя, $\text{с}^{-1}$	$\approx 6 \cdot 10^{14}$	$4,2 \cdot 10^{14}$ [50]
Плотность потока, средняя по времени, $\text{см}^{-2}/\text{с}$	$\approx 2 \cdot 10^{12}$	$4,6 \cdot 10^{12}$ [51]
Флюенс за один импульс, $\text{см}^{-2}$	$\approx 0,4 \cdot 10^{12}$	$\approx 0,07 \cdot 10^{12}$

Из данных, приведенных в таблице, видно, что шариковый холодный замедлитель нейтронов на основе ароматических углеводородов КЗ-202 на реакторе ИБР-2 имеет нейтронные характеристики, близкие к SNS, а по флюенсу нейтронов за один импульс мощности превосходит его в шесть раз (за счет меньшей частоты импульсов мощности реактора). Это создает дополнительные возможности изучения быстротекающих процессов (с характерными временами менее 0,1 с) и исследований с очень холодными нейтронами до 20–25  $\text{\AA}$ , что проблематично для SNS из-за наложения медленных нейтронов последующих импульсов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Wilkinson D., Lucas A. T.* A combined  $\text{H}_2/\text{CH}_4$  cold moderator for a short-pulsed neutron source // Proc. of the 10th Meeting of the Intern. Collab. on Advanced Neutron Sources (ICANS X), Institute of Physics Conference Series Number 97, Los Alamos National Laboratory, Institute of Physics, October 1988. P. 559.
2. *Lucas A. T., Bauer G. S., Sulfridge C. D.* A pelletized solid methane moderator for a medium-to-high power neutron source // Proc. of the 13th Meeting of the Intern. Collab. on Advanced Neutron Sources, ICANS XIII, Villigen, Switzerland, November 1995 / Eds. G.S. Bauer, R. Bercher. Paul Scherrer Institut Proceedings 95-02, 1996. V. II. P. 644–652.
3. *Stelzer H., Barnert-Wiemer H., Bayer N.* // J. Neutron Res. 2003. V. 11. No. 1–2. P. 99.
4. *Bauer G. S.* Pulsed Neutron Source Cold Moderators: Concepts, Design and Engineering // Proc. of Intern. Workshop on Cold Moderators for Pulsed Neutron Sources. ANL, USA, Sept. 29–4 Oct. 1997. Edition of OECD. 1998. P. 27–42.

5. *Carpenter J. M. et al.* The IPNS grooved solid methane moderator // Proc. of ICANS VIII, RAL 85-110. 1985. V. 1. P. 311–318.
6. *Inoue K., Iwasa H., Kiyonagi Y.* // J. Atomic Energy Society of Japan. 1979. V. 21. P. 865.
7. *Ikeda S. et al.* Cold Neutron Moderator at KENS-I // Proc. of the Intern. Collab. on Advanced Neutron Sources, ICANS-IX, PSI, Villigen, Sept. 22–26, 1986. V. II. P. 18–26.
8. *Zemlyanov M. G.* Propane Cold Neutron Source: Creation and Operation Experience // Ibid. P. 87–96.
9. CNS world directory by K. Gobrecht: <http://www.ottosix.com>
10. *Belyakov A. A., Ermilov V. G., Lomidze V. L., Melikhov V. V., Shabalin E. P.* The First Experience of a Cold Moderator and of Solid Methane Irradiation at the IBR-2 Pulsed Reactor // Proc. of the 12th Meeting of Intern. Collab. on Advanced Neutron Sources, ICANS-XII, Abingdon, Oxon, England, May 25–28, 1993. RAL Report 94-025. 1994. V. II. P. 144–155.
11. *Belyakov A. A., Melikhov V. V., Pepelyoshev Yu. N., Shabalin E. P.* Solid methane cold moderator at the IBR-2 reactor // J. of Neutron Research. 1996. V. 3. P. 209–221.
12. *Beliakov A. A., Tretiakov I. T., Shabalin E. P.* First experience with the new solid methane moderator at the IBR-2 reactor // Proc. of 15th Meeting of the Intern. Collab. on Advanced Neutron Sources, Tsukuba, Japan, Nov. 6–9, 2000.
13. *Allen G. M. et al.* The ISIS Cold Moderators // Proc. of the Intern. Workshop on Cold Moderators for Pulsed Neutron Sources, Argonne, Illinois, 29 Sep. – 2 Oct. 1997. OECD Brochure. 1998. P. 43–54.
14. <http://www.isis.stfc.ac.uk/about-isis/target-station-2/target-station-27974.html>
15. *Carpenter J. M.* Cold Moderator for Pulsed Neutron Sources // Proc. of the Intern. Workshop on Cold Neutron Sources, Los-Alamos, USA, March 5–8, 1990. LA-12146-C. 1991. P. 131–153.
16. *Mezei F. J.* // Physica B. Condensed Matter. 1997. V. 234–236. P. 279–280.
17. *Шабалин Е. П.* Холодный замедлитель нейтронов // ЭЧАЯ. 2005. Т. 36, вып. 6. С. 1425.
18. *Аксенов В. Л.* Пульсирующие ядерные реакторы в нейтронной физике // Успехи физических наук. 2009. Т. 179, № 4. С. 434–441.
19. *Bauer G. S. et al.* URAM-2: Irradiation Experiments at the Dubna IBR-2 Reactor. Report ESS 99-92-T, FZJ. 1999.
20. *Kulikov S., Shabalin E., Melikhov V.* Study of fast neutron irradiation effects in cold moderator materials // Part. Nucl., Lett. 2003. No. 5 (114). P. 82–88.
21. *Kulikov S., Shabalin E., Melikhov V., Kulagin E.* Radiation effects in cold moderator materials: Experimental study of accumulation and release of chemical energy // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. 2004. V. 215. P. 181–186.
22. *Shabalin E.* On Radiation Effects in Water Ice at Low Temperatures // Proc. of the ICANS-XIV Meeting, Starved Rock, Illinois, USA, June 1998. ANL-98/33. 1998. V. 2. P. 497–506.

23. Шабалин Е. П., Кулагин Е. Н., Куликов С. А., Мелихов В. В. Радиационные эксперименты с водородсодержащими материалами на криогенной облучательной установке УРАМ-2 реактора ИБР-2 // Атомная энергия. 2004. Т. 97, вып. 3. С. 183–189.
24. Cser L. Organic Compounds for Cold Moderators // Proc. of the ICANS-XIV Meeting, Starved Rock, Illinois, USA, June 1998. ANL-98/33. 1998. V. 2. P. 241–244.
25. David D. Clark et al. On the Design of a Cold Neutron Source // Nucl. Sci. and Eng. 1992. V. 110. P. 445–454.
26. Utsuro M., Sugimoto M. // J. of Nucl. Sci. Technol. 1977. V. 14. P. 390.
27. Wehring B. W., Unlu K. // Proc. of the Intern. Seminar on Advanced Pulsed Neutron Sources: Physics off at Advanced Pulsed Neutron Sources (PANS II), Dubna, June 14–16, 1994. P. 285–301.
28. Unlu K., Rios-Martinez C., Wehring B. W. // J. of Radioanalytic and Nucl. Chem. 1995. V. 193, No. 1. P. 145–154.
29. Natkaniec I., Shabalin E., Kulikov S., Holderna-Natkaniec K. Comparative studies of neutron scattering and radiation properties of methane, methanol, mesitylene and water at low temperatures // ICANS-XVII 17th Meeting of the Intern. Collab. on Advanced Neutron Sources. Santa Fe, New Mexico. April 25–29, 2005.
30. Natkaniec I., Holderna-Natkaniec K., Kalus J. // Physica B. 2004. V. 350. P. 651.
31. Cantargia F., Granada J. R., Petriwa S., Scaffoni M. M. New scattering kernels for some materials of interest as advanced cold neutron moderators // Physica B. 2006. V. 385–386. P. 1312–1314.
32. Kulikov S., Shabalin E. New complex of moderators for condensed matter research at the IBR-2M reactor // Romanian J. of Physics. 2009. V. 54. P. 3–4.
33. Kulikov S., Shabalin E. Complex of neutron moderators for the IBR-2M reactor // Proc. of 17th Meeting of the Intern. Collab. on Advanced Neutron Sources, ICANS-XVII. Santa Fe, New Mexico; April 25–29, 2005.
34. Shabalin E. P. et al. Pelletized Cold Neutron Moderators for the IBR-2M Reactor // Proc. of the 6th Intern. Workshop on UCN&CN Physics and Sources, St. Petersburg, Moscow, July 1–7, 2007; <http://cns.pnpi.spb.ru/ucn/articles/Shabalin.pdf>
35. Кулагин Е. Н., Куликов С. А., Шабалин Д. Е., Шабалин Е. П., Бузыкин О. Г., Казаков А. В. О пневмотранспортировке твердых шариков холодного замедлителя нейтронов. Сообщение ОИЯИ Р13-2008-116. Дубна, 2008. 16 с.
36. Булавин М. В., Кулагин Е. Н., Куликов С. А., Мухин К. А., Шабалин Д. Е., Шабалин Е. П. Моделирование пневмотранспорта твердых шариков холодного замедлителя нейтронов: распределение скорости и времени движения. Сообщение ОИЯИ Р13-2009-72. Дубна, 2009. 16 с.
37. Шабалин Е. П. О нерегулярности движения шара при пневмотранспорте в трубе. Сообщение ОИЯИ Р3-2008-67. Дубна, 2008. 12 с.
38. Kulikov S., Belyakov A., Bulavin M., Kulagin E., Kustov A., Mukhin K., Fedorov A., Shabalin E., Shabalin D. Full scale model of pelletized cold neutron moderators for the IBR-2M reactor // Proc. of Intern. Collab. on Advanced Neutron Sources (ICANS XIX), PSI, Grindelwald, Switzerland, 2010.
39. Shabalin E., Kulikov S. // Neutron News. 2011. V. 22, Iss. 2. P. 28–30.

40. Kulikov S., Ananiev V., Belyakov A., Bogdzal A., Bulavin M., Verhoglyadov A., Kulagin E., Kustov A., Mukhin K., Lubimtsev A., Petukhova T., Sirotin A., Fedorov A., Shabalin E., Shabalin D., Sitnik M., Shirokov V. Test stand of the technological system of the cryogenic moderator with the control electronics // J. of Science and Arts. 2011. No. 3(16). P. 339–346.
41. Nuenighoff K. et al. Neutron experiments with cryogenic methane hydrate and mesitylene moderators // Eur. Phys. J. A. Hadrons and Nuclei. 2008. V. 38. P. 115–123.
42. Utsuro M., Sugimoto M., Fujita Y. // Ann. Rep. Reactor Instr. Kyoto Univ. 1975. V. 8. P. 17.
43. Баранов И. М., Воронин И. И., Ермилов В. Г., Кулагин Е. Н., Куликов С. А., Мелихов В. В., Пушкарь Р. Г., Мин Ро Ду, Шабалин Д. Е., Шабалин Е. П. Изучение процесса выхода радиолитического водорода из экспериментального элемента холодного замедлителя на твердом мезитиле. Сообщение ОИЯИ РЗ-2004-212. Дубна, 2004.
44. Куликов С. А., Шабалин Е. П. Сравнение эффективности материалов холодных замедлителей нейтронов для реактора ИБР-2М. Сообщение ОИЯИ Р17-2005-222. Дубна, 2005.
45. Белушкин А. В. и др. Двухкоординатный мониторинг позиционно-чувствительный детектор тепловых нейтронов // ЖТФ. 2008. Т. 78, № 1. С. 121–125.
46. Куликов С. А., Калинин И. В., Морозов В. М., Новиков А. Г., Пучков А. В., Черников А. Н., Шабалин Е. П. Измерение спектров холодных нейтронов на макете криогенного замедлителя реактора ИБР-2М // Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т. 7, № 1 (157). С. 95–100. English version in Physics of Part. Nucl., Lett. 2010. V. 7, No 1. P. 57–60.
47. Kiyonagi Y., Ono T., Ooi M., Ohnuma S., Kamiyama T., Iwasa H., Hiraga F. Measurements of Neutronic Characteristics of a Mesitylene Moderator // Proc. of the 17th Meeting of the Intern. Collab. on Advanced Neutron Sources (ICANS-XVII), Santa Fe, New Mexico. April 25–29, 2005. P. 506–510.
48. Golikov V. V., Kulagin E. N., Shabalin E. P. Dose Rates near Water Moderator of the IBR-2 Reactor: Experiment and Analysis. JINR Communication E16-2002-79. Dubna, 2002. 14p.
49. Stuart D. Henderson. Spallation Neutron Source, Commissioning and Early Operations // Proc. of the 18th Meeting of the Intern. Collab. on Advanced Neutron Sources (ICANS-XVIII), Dongguan, Guangdong, China, April 25–29, 2007. P. 54–60.
50. Carpenter J. Neutron Generation // National School on Neutron and X-ray Scattering, ANL/ORNL, August 12–25, 2012; neutrons.ornl.gov/conf/nxs2012/pdf/carpenter-neutron-generation.pdf
51. Gallmeier F. X., Iverson E. B., Lu W., Ferguson P. D., Crawford R. K. SNS Second Target Station Moderator Performance Update // Proc. of the 19th Meeting of the Intern. Collab. on Advanced Neutron Sources (ICANS-XIX), Grindelwald, Switzerland. March 8–12, 2010.

Получено 9 ноября 2012 г.



Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 11.03.2013.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,06. Уч.-изд. л. 1,24. Тираж 265 экз. Заказ № 57940.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)