

## Холодный замедлитель нейтронов на модернизированном реакторе ИБР-2. Первые результаты пуска

© В.Д. Ананьев, А.А. Беляков, М.В. Булавин, А.Е. Верхоглядов, С.А. Куликов, К.А. Мухин, Е.П. Шабалин

Объединенный институт ядерных исследований,  
Дубна, Россия  
e-mail: ksa@nf.jinr.ru

(Поступило в Редакцию 17 июля 2013 г.)

Произведен физический пуск нового замедлителя нейтронов КЗ-202 на реакторе ИБР-2М. Замедлитель состоит из двух частей: теплой — гребенчатого водяного замедлителя комнатной температуры и холодной — замедлителя на основе смеси ароматических углеводородов (мезитилена и *m*-ксилола). Холодный замедлитель заполняется заранее приготовленными гранулами из данной смеси потоком холодного газа гелия и работает при температуре 30 К. Сочетание двух частей в одном замедлителе позволяет одновременно получать как тепловой, так и холодный спектры нейтронов для спектрометров на выведенных пучках. Расположение холодного замедлителя в сочетании с тепловым было численно оптимизировано методом Монте-Карло. Использование холодного замедлителя позволило увеличить интенсивность холодных нейтронов с его поверхности в 13 раз.

### Введение

В замедлителях нейтронов осуществляется снижение энергии быстрых нейтронов источника вплоть до их термализации, создавая нужный спектр внешних нейтронных пучков. Наиболее востребованы для новых проектов интенсивных нейтронных источников „холодные“ замедлители с температурой замедляющего вещества 20–100 К, которые дают повышенный выход „холодных“ нейтронов с длиной волны более 4 Å. В ныне действующих замедлителях в качестве замедляющего вещества используют обычную воду, жидкий водород, жидкие углеводороды (метан, пропан), твердый метан. В принципе возможно применение еще полиэтилена, замороженных смесей метана с инертным газом или ненасыщенными углеводородами, метана в цеолитах, гидратов метана, аммиака, ароматических углеводородов (в частности, триметилбензола) и др. [1–7].

В период 2000–2004 гг. в ОИЯИ были проведены исследования поведения водородосодержащих веществ (в том числе твердого мезитилена и родственного ароматического углеводорода толуола) при облучении быстрыми нейтронами на специальных установках УРАМ 2, УРАМ 3 на радиационном канале ИБР-2, и быстрыми электронами — на микротроне МТ-25 в условиях, близких к условиям работы холодного замедлителя модернизированного ИБР-2 на мощности 2 Мв, в течение длительного времени [8–10]. На основе этих данных и зарубежного опыта использования мезитилена как замедлителя на источниках более низкой мощности был разработан проект с шариками твердого мезитилена, обеспечивающий его непрерывную работу с постоянной температурой.

### Описание установки „шариковый холодный замедлитель нейтронов“ на реакторе ИБР-2М

Холодный замедлитель нейтронов на реакторе ИБР-2М является первым из запланированных трех холодных замедлителей комплекса замедлителей, установленных с одной из сторон шестигранного корпуса реактора за отражателем нейтронов (рис. 1).

В состав комплекса замедлителей для данного направления (рис. 2) помимо шарикового холодного замедлителя входят водяной предзамедлитель, два водяных замедлителя гребенчатого типа и постзамедлители, обеспечивая для всех спектрометров, расположенных

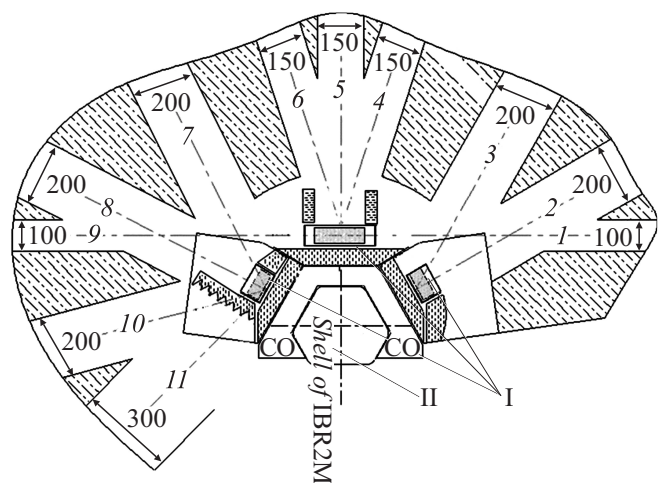
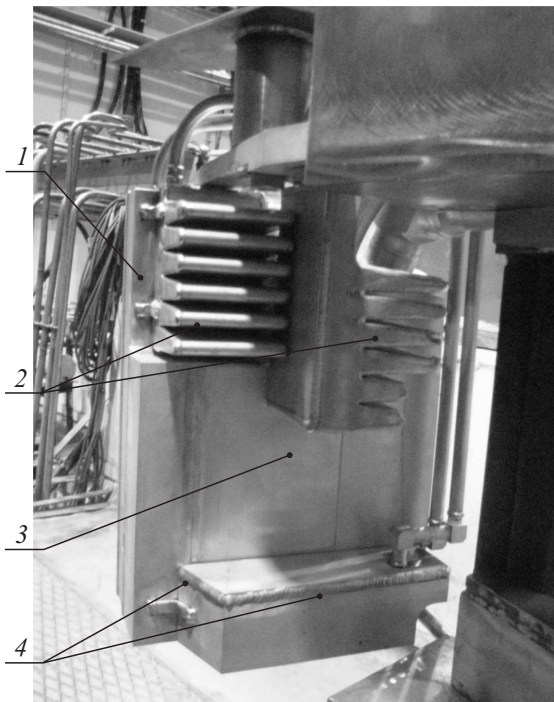


Рис. 1. Схематический вид плана установки холодных замедлителей нейтронов реактора ИБР-2М. (I — холодные замедлители, II — активная зона реактора, 1–11 — каналы в биологической защите вывода нейтронов).



**Рис. 2.** 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).

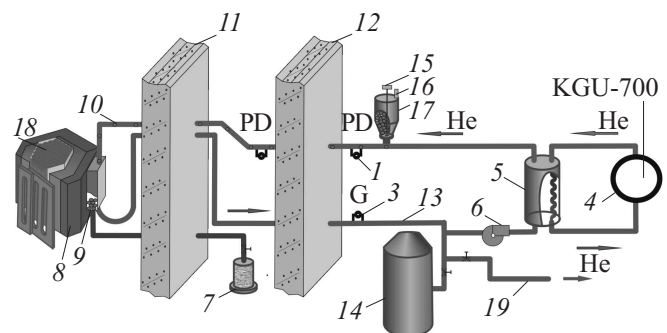
на четырех пучках нейтронов с этой стороны реактора (7-й, 8-й, 10-й и 11-й пучки), требуемый оптимальный спектр холодных и тепловых нейтронов. Это спектрометры текстурных исследований методом дифракции, рефлектометры поляризованных нейтронов, спектрометр неупругого рассеяния и др.

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 0.6–0.62, получаем эффективную толщину слоя замедляющего вещества 24–25 мм, что является оптимальным для выхода холодных нейтронов с поверхности замедлителя при наличии водяного предзамедлителя толщиной 50 мм [11]. Максимальное тепловыделение в шариках твердой аморфной смеси мезитилена и *m*-ксилола от замедления нейтронов и поглощения гамма-квантов — 0.17 W/g, полная мощность тепловыделения в замедлителе (с учетом стенок камеры) достигает 160–170 W. Замедлитель охлаждается проходящим сверху вниз сквозь засыпку шариков холодным гелием от холодильной машины КГУ-700 с температурой 24–26 К, при этом средняя температура мезитилена в камере замедлителя при расходе охлаждающего гелия 6 g/s равна 30–32 К.

Принципиальная технологическая схема работы шарикового холодного замедлителя дана на рис. 3. За-

грузка шариков в камеру замедлителя (9) реактора ИБР-2М (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 g/s. 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 23 000–24 000 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 „камера-обскура“ 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 перед сливом жидкой смеси из камеры в емкость для сбора (7).



**Рис. 3.** Принципиальная технологическая схема холодного замедлителя. Описание узлов и агрегатов дано в тексте. 11, 12 — биологическая защита реактора, 14 — ресивер газообразного гелия, 19 — линия сброса радиолитического водорода в атмосферу при отогреве шариков.

Поддержание низкой температуры шариков  $\sim 30$  К после загрузки осуществляется по тому же контуру (10), (13) при большем расходе гелия (до 6 г/с).

### Статус шарикового холодного замедлителя нейтронов КЗ-202, осуществление физического пуска замедлителя

В период 2010–2011 г. 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. 4) [12–13]. В конце февраля 2012 г. был закончен монтаж первого комплекса замедлителей реактора ИБР-2М с холодным замедлителем, пред- и постзамедлителями и гребенчатыми водяными замедлителями и всех технологических систем, необходимых для его пуска. Пуск холодного замедлителя и ввод в эксплуатацию проводится в два этапа:

- проведение физического пуска (работа установки без мощности реактора с загруженными шариками в камеру замедлителя. На малой мощности не выше 0.5 МВт, 25% номинальной мощности);

- осуществление программы детальных исследований характеристик и ресурсных возможностей замедлителя на номинальной мощности реактора 2 МВт.

Физический пуск холодного замедлителя был успешно осуществлен в конце 2012 г. Наиболее существенными результатами пуска 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



Рис. 4. Полномасштабный технологический стенд криогенного замедлителя.

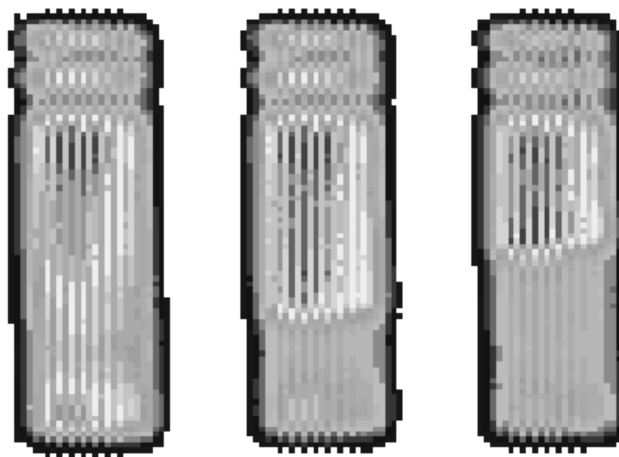


Рис. 5. Нейтронное изображение части комплекса замедлителей с холодным замедлителем, расположенным в нижней половине, при разном уровне заполнения шариками: пустая камера (слева), заполненная на 2/3 (в центре) и полная (справа).

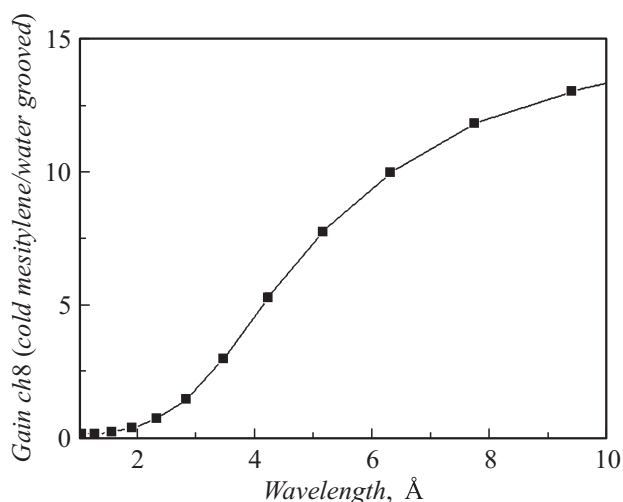


Рис. 6. Фактор выигрыша потока холодных нейтронов мезитиленового замедлителя относительно водяного гребенчатого замедлителя (расчет Монте-Карло).

титилена путем его плавления с выходом практически 100% загруженного материала;

- достигнута температура шариков мезитилена в камере ниже 30 К (при мощности реактора 460 кВт и  $\sim 30$  К, при номинальной мощности 2 МВт);

- проверена надежность работы контрольной измерительной системы холодного замедлителя в течение длительного времени (более пяти суток), в том числе системы непрерывного контроля прохождения шариков по тракту подачи в камеру во время загрузки.

- измерены нейтронно-физические характеристики холодного замедлителя, а именно спектры нейтронов при температурах замедлителя 100 и 29 К, и фактор выигрыша плотности потока холодных нейтронов по

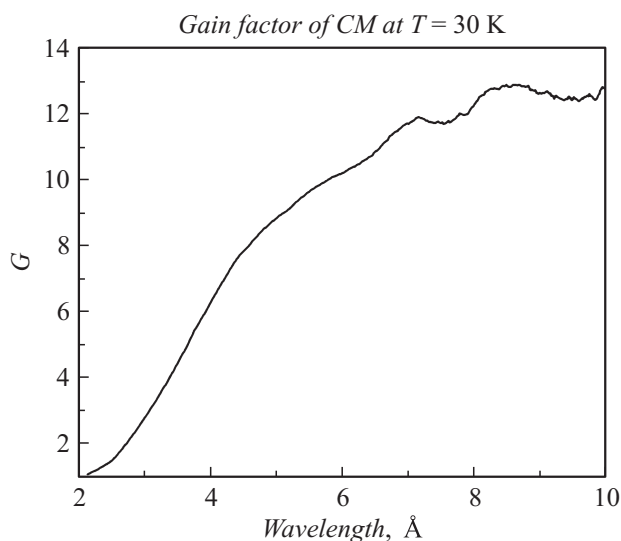


Рис. 7. Измеренный выигрыш в холодных нейтронах при использовании холодного замедлителя.

сравнению с плоским водяным замедлителем комнатной температуры, который оказался близок к расчетному. Измерения спектров нейтронов проводились на „мониторе“ (двухкоординатный позиционно-чувствительный детектор [14] на длинной базе канала № 8 в режиме камеры-обскуры с регистрацией нейтронов по методу времени пролета). Одновременно режим камеры-обскуры (с узкой горизонтальной щелью в качестве „объектива“, что давало одномерную развертку вида замедлителя по вертикали) позволил наблюдать изменение высоты засыпки шариков непосредственно в камере замедлителя по характеру спектра нейтронов (рис. 5).

Расчетный фактор выигрыша дифференциальной плотности потока холодных нейтронов от холодного замедлителя по сравнению с традиционным для реактора ИБР-2 водяным замедлителем гребенчатого типа дан на (рис. 6) [11]. Полученные результаты расчета и эксперимента (рис. 7) с учетом неидеальности условий эксперимента имеют достаточно хорошее согласие.

## Заключение

Произведен физический пуск первого холодного замедлителя нейтронов на основе ароматических углеводородов с загрузкой материала замедлителя в виде отдельных шариков. Проверена его работоспособность на номинальной мощности реактора 2 Мв. Средняя температура замедлителя составила 30 К. В результате измерений спектров нейтронов установлено, что выход длинноволновых нейтронов с поверхности криогенного замедлителя по сравнению с водяным замедлителем увеличился до 13 раз.

## Список литературы

- [1] Wilkinson D., Lucas A.T. // Proc. of the 10<sup>th</sup> Meeting of the Intern. Collaboration on Advanced Neutron Sources (ICANS X). Los Alamos National laboratory, Institute of Physics, 1988. P. 559.
- [2] Lucas A.T., Bauer G.S., Sulfredge C.D. // Proc. of the 13<sup>th</sup> Meeting of the Intern. Collaboration on Advanced Neutron Sources, ICANS XIII, Villigen, Switzerland, 1995. Paul Scherrer Institut Proceedings 95-02. 1996. Vol. II. P. 644–652
- [3] Carpenter J.M., Schulke A.W., Scott T.L. et al. // Proc. of ICANS VIII. RAL 85-110. 1985. Vol. 1. P. 311–318.
- [4] Inoue K., Iwasa H., Kiyonagi Y. // J. Atom. Energ. Soc. Jpn. 1979. Vol. 21. P. 865.
- [5] Ikeda S. et al. // Proc. of the Intern. Collaboration on Advanced Neutron Sources, ICANS-IX, PSI. Villigen, 1986. Vol. II. P. 18–26.
- [6] Belyakov A.A., Melikhov V.V., Pepelyoshev Yu.N., Shabalin E.P. // J. Neutr. Res. 1996. Vol. 3. P. 209–221.
- [7] Куликов С.А., Шабалин Е.П. // Сообщения ОИЯИ. 2005. P17–2005–222.
- [8] Kulikov S., Shabalin E., Melikhov V., Kulagin E. // Nucl. Instrum. Meth. B. 2004. Vol. 215. P. 181–186.
- [9] Кулагин Е.Н., Куликов С.А., Мелихов В.В., Шабалин Е.П. // Nucl. Instrum. Meth. B. 2004. Vol. 215. P. 181–186.
- [10] Шабалин Е.П., Кулагин Е.Н., Куликов С.А., Мелихов В.В. // Атомная энергия. 2004. Т. 97. Вып. 3. С. 183–189.
- [11] Kulikov S., Shabalin E. // Rom. J. Phys. 2009. Vol. 54. N 1. P. 3–4.
- [12] Kulikov S., Belyakov A., Bulavin M., Kulagin E., Kustov A., Mukhin K., Fedorov A., Shabalin E., Shabalin D. // Proc. Intern. Collaboration on Advanced Neutron Sources (ICANS XIX), PSI. Grindelwald, Switzerland, 2010.
- [13] Kulikov S., Ananiev V., Belyakov A., Bogdzel A., Bulavin M., Verhoglyadov A., Kulagin E., Kustov A., Mukhin K., Lubimtsev A., Petukhova T., Siroitin A., Fedorov A., Shabalin E., Shabalin D., Sitnik M., Shirokov V. // J. Sci. Art. 2011. Vol. 16. N 3. P. 339–346.
- [14] Белишкин А.В., Богдзель А.А., Журавлев В.В. и др. // ЖТФ. 2008. Т. 78. № 1. С. 121–125.