

ОПТИМИЗАЦИЯ И СРАВНЕНИЕ ВАРИАНТОВ ГОЛОВНОЙ ЧАСТИ ЗАМЕДЛИТЕЛЯ «ЦЕНТРАЛЬНОГО» НАПРАВЛЕНИЯ РЕАКТОРА ИБР-2

К. А. Мухин¹, А. Д. Rogov

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлены результаты теоретических расчетов, направленных на оптимизацию головной части комбинированного замедлителя нейтронов в направлении экспериментальных пучков 1, 4–6 и 9 реактора ИБР-2. Приведены данные компьютерного моделирования различных вариантов конструкции головной части замедлителя с расчетом фактора выигрыша по сравнению с гребенчатым водяным замедлителем. На основе расчетных данных выбрана оптимальная конфигурация головной части замедлителя с учетом нейтронно-физических характеристик выбранной модели и технологической возможности изготовления комбинированного замедлителя.

Herein theoretical calculations are presented in order to optimize the head part of combined neutron moderator in the direction of experimental beams 1, 4–6 and 9 at IBR-2 reactor. The data on computer simulations for the different options of design of the moderator head part, including the calculations of advantageous factor in comparison to comb-like water moderator are given. According to calculated data, the optimized configuration of the moderator head part is chosen with regard to the neutronic characteristics of selected model and technological options for designing the combined moderator.

PACS: 07.05.Kf; 07.77.Gx; 28.20.Cz; 28.20.Fc; 28.20.Gd; 28.41.Ak; 28.41.Pa

Памяти В. Д. Ананьева

ВВЕДЕНИЕ

Эксперименты с использованием «холодных» нейтронов, длины волн которых превышают 4 Å, проводятся на высокопоточных исследовательских нейтронных источниках начиная с 1980-х гг. Для увеличения потока холодных нейтронов применяются холодные замедлители, работающие при криогенных температурах. В качестве вещества, в котором происходит процесс замедления нейтронов, используются самые различные материалы: вода, тяжелая вода, лед, парафин, бериллий, жидкий водород, жидкий и твердый метан, а также различные углеводороды. В процессе замедления нейтрон взаимодействует с ядрами вещества-замедлителя и, сталкиваясь с ними, постепенно теряет свою энергию. Количество потерянной нейтроном энергии при столкновении определяется формулой

¹E-mail: kostik001@mail.ru

$2A/(A+1)^2$, где A — массовое число ядра. Из формулы видно, что при упругом взаимодействии с атомом водорода нейтрон потеряет половину своей энергии при соударении. Величина потери энергии нейтроном будет тем меньше, чем больше атомарное число вещества-замедлителя. Этим и объясняется использование в качестве замедлителей нейтронов веществ, в молекулярный состав которых входит водород.

На импульсном реакторе ИБР-2 в Дубне в качестве замедляющего вещества используется мезитилен в смеси с м-ксилолом в пропорции 3/1, приготовленный в форме шариков диаметром 3,5 мм в твердом агрегатном состоянии при температуре в камере замедлителя 32 К. Шарiki смеси доставляются в камеру замедлителя потоком газообразного гелия по трубопроводу со сложной конфигурацией методом пневмотранспортировки. В 2006 г. реактор ИБР-2 был остановлен на модернизацию, одним из этапов которой было создание источника холодных нейтронов. Геометрия активной зоны реактора и выведенных исследовательских нейтронных пучков предполагает размещение 3 комбинированных замедлителей, окружающих активную зону реактора [1]. Первым был изготовлен и установлен на штатное место замедлитель КЗ 202 в направлении 7, 8, 10, 11 нейтронных пучков. В результате были получены оптимальные характеристики работы систем замедлителя при различных режимах, определены нейтронно-физические характеристики замедлителя, найдено оптимальное время работы, экспериментальным путем измерена деградация нейтронного потока в зависимости от дозы облучения [2]. Полученные данные, а также надежность эксплуатации позволили продолжить работу и приступить к созданию замедлителя КЗ 201 для центрального направления (пучки 1, 4–6, 9). В данной работе представлен этап выбора оптимальной конфигурации головной части замедлителя КЗ 201 по его нейтронно-физическим характеристикам.

1. РЕАКТОР ИБР-2 И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ В НАПРАВЛЕНИИ КЗ 201

На реакторе ИБР-2 существуют 14 каналов, предназначенных для проведения экспериментов на выведенных пучках нейтронов. Геометрия активной зоны реактора такова, что с поверхности одного замедлителя выводятся сразу несколько пучков (рис. 1). Нейтроны, рожденные в активной зоне, проходят через эти замедлители, теряя там энергию до необходимых величин, попадают в выведенные пучки и далее — на экспериментальные установки. Практически все спектрометры на реакторе ИБР-2 являются специализированными, т. е. предназначенными для выполнения определенного круга экспериментальных задач, что предполагает оптимизацию используемого нейтронного спектра.

В направлении КЗ 201 (обозначим его как центральное) расположены пучки 1, 4–6, 9 экспериментальных установок: 1 — «Колхида» (спектрометр поляризованных нейтронов); 4 — ЮМО (спектрометр малоуглового рассеяния); 5 — ФДВР (фурье-дифрактометр высокого разрешения); 6 — ДН-6 (спектрометр для определения кристаллической и магнитной структуры материала при большом давлении); 9 — «Рефлекс» (рефлектометр поляризованных нейтронов для определения структурных характеристик тонких пленок и многослойных гетеросистем).

Из рис. 2 видно, что замедлитель КЗ 201 должен обеспечивать смешанный нейтронный спектр в диапазоне 0,4–4 Å. Для получения высокоинтенсивного потока нейтронов с различными спектрами с поверхности замедлителя в требуемых направлениях были

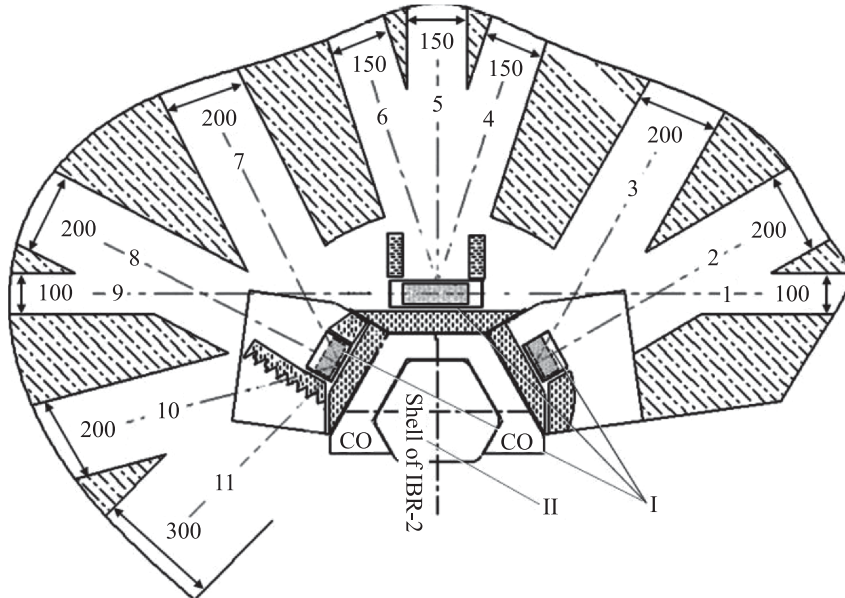


Рис. 1. Схематическое расположение криогенных замедлителей вокруг активной зоны реактора ИБР-2. I — холодные замедлители; II — активная зона реактора; 1–11 — каналы вывода нейтронов в биологической защите соответствующих направлений экспериментальных пучков

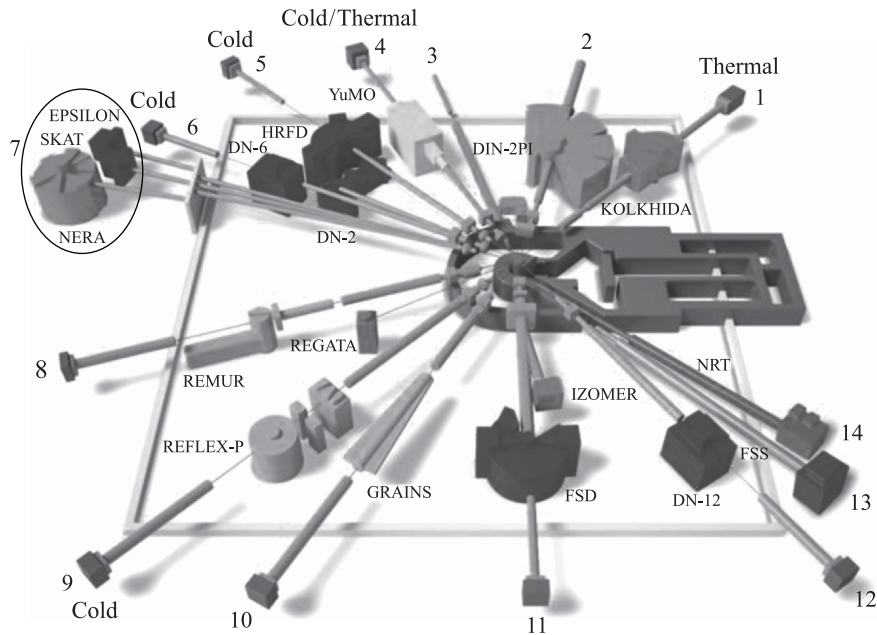


Рис. 2. Распределение необходимого спектра нейтронов на инструментах в направлении выведенных пучков 1, 4–6, 9. Cold — «холодные» нейтроны, $\lambda \geq 4 \text{ \AA}$; thermal — «тепловые» нейтроны, $\lambda \sim 0,4\text{--}4 \text{ \AA}$, где λ — длина волны нейтрона

Таблица 1. Проектные параметры спектра нейтронов в направлении пучков 1, 4–6, 9

№ пучка	E , эВ	λ , Å
1	$5 \cdot 10^{-3} - 0,5$	0,4–4
4	$5 \cdot 10^{-3} - 0,1$	1–6
5	$10^{-3} - 0,3$	0,7–16
6	$10^{-4} - 10^{-2}$	1,2–26
9	$5 \cdot 10^{-4} - 2,5 \cdot 10^{-2}$	2–10

разработаны концепции головной части замедлителя. Проектные параметры спектра нейтронов замедлителя центрального направления КЗ 201 для каждого из экспериментальных пучков представлены в табл. 1 [3].

2. ВАРИАНТЫ ГОЛОВНОЙ ЧАСТИ ЗАМЕДЛИТЕЛЯ КЗ 201

При разработке оптимальной конфигурации головной части замедлителя КЗ 201 были предложены к рассмотрению различные варианты компоновки составных частей и различные замедляющие материалы, представленные на рис. 3.

- Вариант № 1 представляет собой опорную модель с холодным замедлителем в центре, водяными рамками по бокам и водяной рамкой со стороны первого канала (позволяющей получить смещенный спектр и смещение пика максвелловского спектра в сторону коротких длин волн).

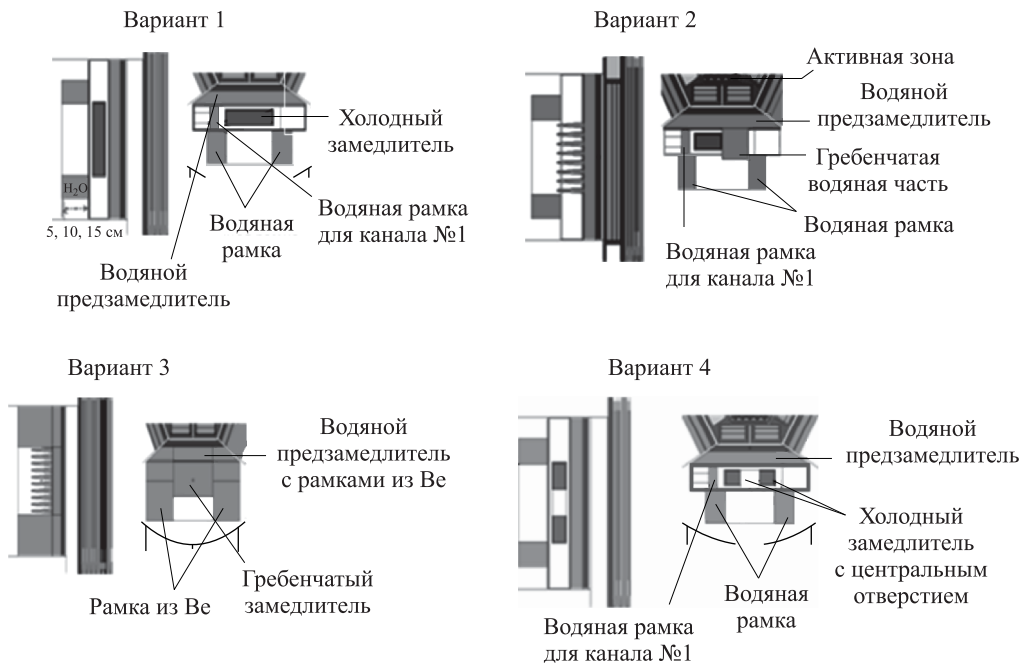


Рис. 3. Варианты головной части замедлителя КЗ 201

- Вариант № 2 имеет комбинацию, которая включает в себя криогенную камеру в половину фокусирующего окна и водяную камеру увеличенной толщины для получения пика спектра в области 3–6 Å. Конфигурация предусматривает фокусирующие водяные рамки и водяную рамку со стороны пучка № 1 для получения теплового спектра.

- Вариант № 3 предусматривает отсутствие камеры холодного замедлителя, часть предзамедлителя выполнена из бериллия, так же как и рамки гребенчатого замедлителя, а в центре находится водяной гребенчатый замедлитель.

- Вариант № 4 представляет собой модификацию варианта № 1 с центральным отверстием в камере холодного замедлителя, обеспечивающим повышенный выход тепловых нейтронов с поверхности предзамедлителя.

Все вышеперечисленные варианты были сравнены со штатным (работающим сейчас) гребенчатым замедлителем. На рис. 4 схематично представлен гребенчатый водяной замедлитель «центрального направления» относительно активной зоны реактора. Фак-

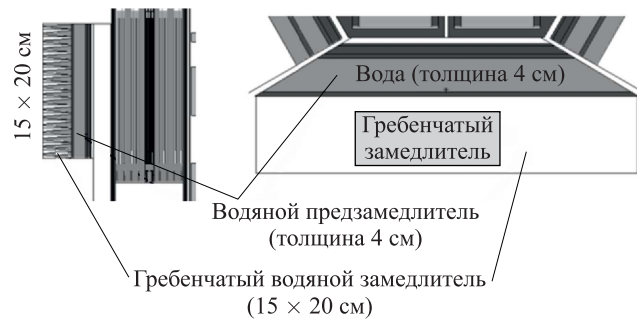


Рис. 4. Гребенчатый водяной замедлитель реактора ИБР-2 экспериментальных пучков 1, 4–6, 9

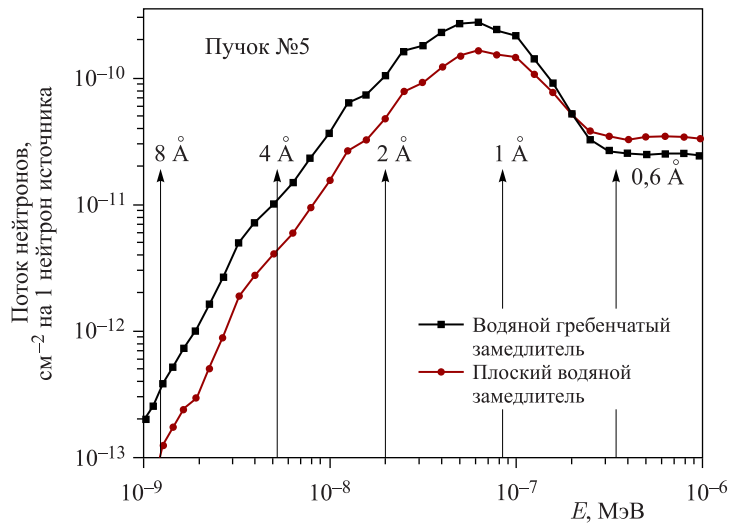


Рис. 5. Сравнительные расчеты потока нейтронов с поверхности плоского водяного замедлителя (толщина 5 см) (кружки) и гребенчатого водяного замедлителя (квадраты)

тор выигрыша (gain-фактор) гребенчатого замедлителя по сравнению с плоским показан на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что при энергии нейтрона ниже чем $2 \cdot 10^{-7}$ МэВ (длина волны $\lambda > 0,6 \text{ \AA}$) гребенчатый водяной замедлитель дает фактор выигрыша 1,64 в среднем в области длин волн от 0,6 до 8 \AA . Наибольший выигрыш (2,6) наблюдается в области больших длин волн — от 4 до 8 \AA , что соответствует области «холодных» нейтронов. Причина увеличения выхода нейтронов с поверхности гребенчатых замедлителей (дырочных) по сравнению с плоскими описана в работе [4]. При дальнейших расчетах все варианты будут сравниваться с гребенчатым водяным замедлителем и между собой.

Из всех представленных вариантов головной части замедлителя (см. рис. 3) были выбраны и детально обчислены первые два. Расчеты проводились методом Монте-Карло (программа MCNP) с использованием дискретных констант из библиотеки ENDF/B-VII [5].

Из рис. 6–9 видно, что оба варианта замедлителя КЗ 201 дают существенный выигрыш в области нейтронов с длиной волны больше 4 \AA по сравнению с гребенчатым водяным замедлителем в направлении экспериментальных пучков 4–6, 9. Выигрыш в тепловой области 0,4–4 \AA в направлении пучка № 1 показан на рис. 10. Он обеспечивается водяной рамкой, расположенной на торцевой части криогенной камеры замедлителя. В табл. 2 приведены данные по расчету фактора выигрыша для варианта № 1 конфигурации головной части по группам нейтронов с длиной волны 0,6– ∞ \AA . Данные в таблице приведены для оси пучка № 5, поэтому выигрыша в тепловой области для пучка № 1 по табл. 2 не наблюдается. В области «холодных» нейтронов более 4 \AA видно увеличение потока до одного порядка. Водяная рамка, окружающая замедлитель, обеспечивает

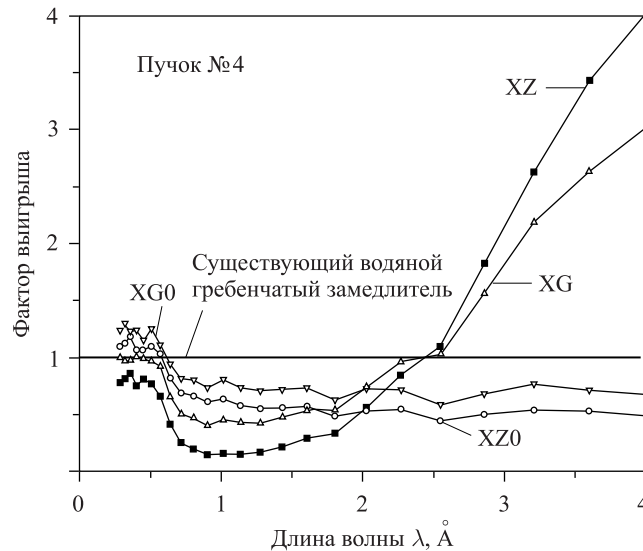


Рис. 6. Фактор выигрыша для варианта замедлителя № 1 (XZ (квадраты) — камера заполнена мезитиленом при $T = 20 \text{ К}$, XZ0 (кружки) — камера пустая при $T = 300 \text{ К}$) и для варианта замедлителя № 2 (XG (треугольники) — камера заполнена мезитиленом при $T = 20 \text{ К}$, XG0 (перевернутые треугольники) — камера пустая при $T = 300 \text{ К}$) в направлении пучка № 4

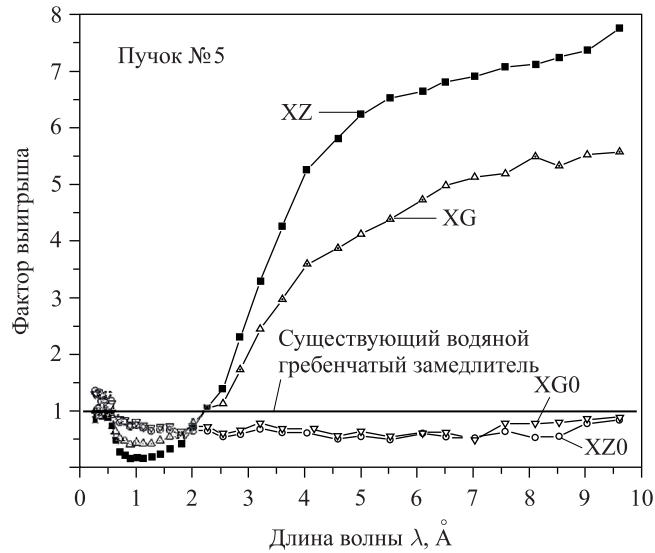


Рис. 7. Фактор выигрыша для варианта замедлителя № 1 (XZ (квадраты) — камера заполнена мезитиленом при $T = 20$ К, XZ0 (кружки) — камера пустая при $T = 300$ К) и для варианта замедлителя № 2 (XG (треугольники) — камера заполнена мезитиленом при $T = 20$ К, XG0 (перевернутые треугольники) — камера пустая при $T = 300$ К) в направлении пучка № 5

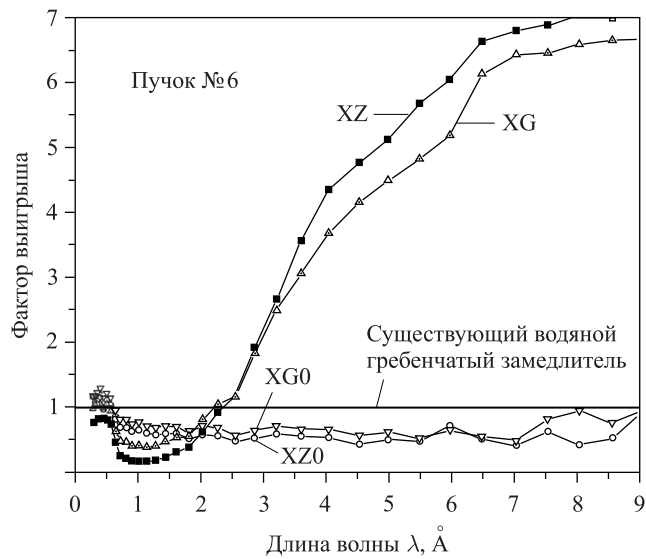


Рис. 8. Фактор выигрыша для варианта замедлителя № 1 (XZ (квадраты) — камера заполнена мезитиленом при $T = 20$ К, XZ0 (кружки) — камера пустая при $T = 300$ К) и для варианта замедлителя № 2 (XG (треугольники) — камера заполнена мезитиленом при $T = 20$ К, XG0 (перевернутые треугольники) — камера пустая при $T = 300$ К) в направлении пучка № 6

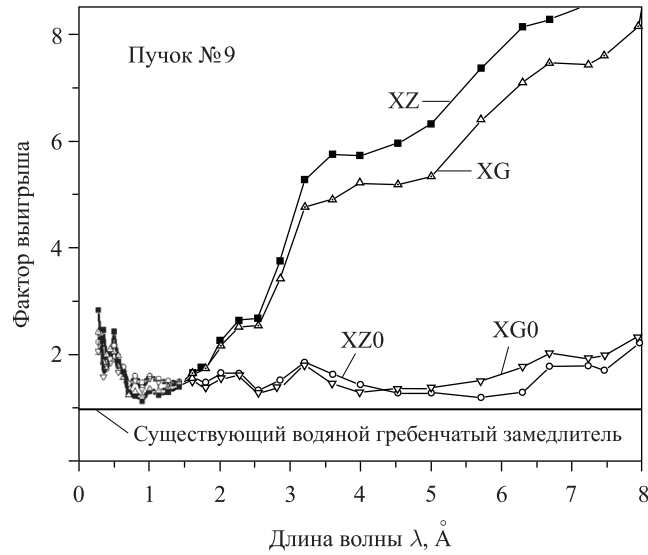


Рис. 9. Фактор выигрыша для варианта замедлителя № 1 (XZ (квадраты) — камера заполнена мезитиленом при $T = 20$ К, XZ0 (кружки) — камера пустая при $T = 300$ К) и для варианта замедлителя № 2 (XG (треугольники) — камера заполнена мезитиленом при $T = 20$ К, XG0 (перевернутые треугольники) — камера пустая при $T = 300$ К) в направлении пучка № 9

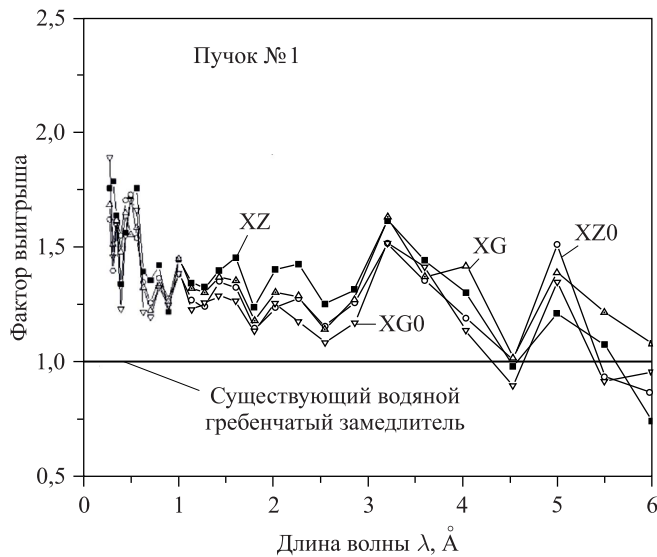


Рис. 10. Фактор выигрыша для варианта замедлителя № 1 (XZ (квадраты) — камера заполнена мезитиленом при $T = 20$ К, XZ0 (кружки) — камера пустая при $T = 300$ К) и для варианта замедлителя № 2 (XG (треугольники) — камера заполнена мезитиленом при $T = 20$ К, XG0 (перевернутые треугольники) — камера пустая при $T = 300$ К) в направлении пучка № 1

Таблица 2. Фактор выигрыша комбинированного замедлителя КЗ 201 (вариант № 1) в сравнении с гребенчатым водяным замедлителем

Длина волны, Å	Энергия, МэВ	G1	G2	G3	G4
$\infty-8$	$0-1,30 \cdot 10^{-9}$	5,67	7,50	8,90	9,57
8-4	$1,30 \cdot 10^{-9}-5,25 \cdot 10^{-9}$	3,21	4,71	5,32	5,73
4-2	$5,25 \cdot 10^{-9}-2,10 \cdot 10^{-8}$	0,78	1,14	1,33	1,43
2-1	$2,10 \cdot 10^{-8}-8,40 \cdot 10^{-8}$	0,14	0,19	0,22	0,24
1-0,6	$8,40 \cdot 10^{-8}-2,30 \cdot 10^{-7}$	0,24	0,26	0,26	0,26

Примечание. Символами G1–G4 обозначены различные условия работы комбинированного замедлителя, где G1 — мезитилен при температуре 20 К, водяная фокусирующая рамка отсутствует; G2 — мезитилен при температуре 20 К, водяная фокусирующая рамка толщиной 5 см при температуре 300 К; G3 — мезитилен при температуре 20 К, водяная фокусирующая рамка толщиной 10 см при температуре 300 К; G4 — мезитилен при температуре 20 К, водяная фокусирующая рамка толщиной 15 см при температуре 300 К.

фокусировку пучка и предотвращает разлет нейтронов тепловой и холодной области после выхода с поверхности замедлителя. Такая компоновка обеспечивает оптимальные нейтронно-физические характеристики замедлителя, согласующиеся с технологической возможностью изготовления головной части описанной конфигурации.

Из табл. 2 и рис. 6–10 видно, что оптимальными нейтронно-физическими свойствами обладает вариант головной части № 1 с толщиной фокусирующей рамки 15 см. Такая конфигурация наиболее оптимальна как с точки зрения нейтронно-физических характеристик, так и технологической возможности изготовления и эксплуатации. На рис. 11 представлена рабочая модель головной части замедлителя КЗ 201 в продольном разрезе.

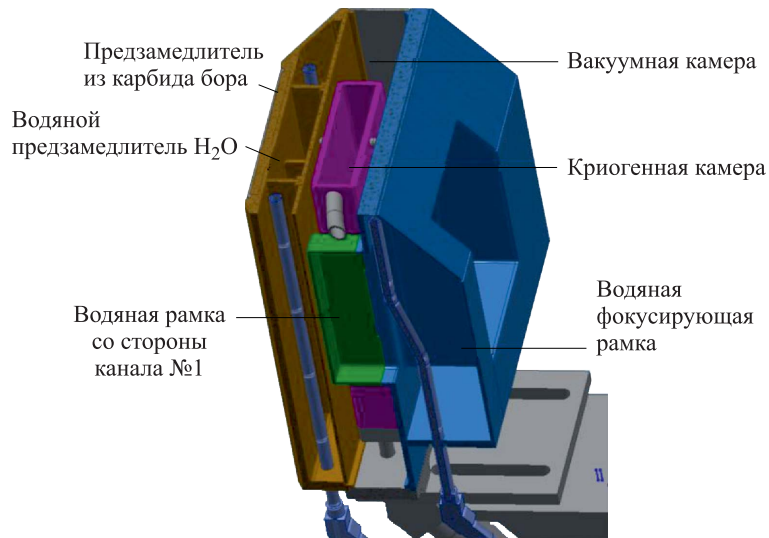


Рис. 11. Рабочая модель головной части комбинированного замедлителя КЗ 201

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные варианты головной части комбинированного замедлителя КЗ 201 (см. рис. 3) были детально рассчитаны и сравнены с действующим замедлителем гребенчатой формы с постоянно циркулирующей водой в камере замедлителя в качестве замедляющего вещества. В криогенной камере комбинированного замедлителя КЗ 201 (см. рис. 8) в качестве замедляющего вещества выбран мезитилен в смеси с м-ксилолом в пропорции 3/1. В качестве предзамедлителя выступает полость, заполненная карбидом бора, за ней еще одна полость с постоянно циркулирующей водой. Водяная рамка толщиной 11 см, шириной 43 см, имеющая центральное отверстие квадратной формы (по форме криогенной камеры) и расположенная со стороны экспериментальных пучков, обеспечивает фокусировку пучка «холодных» нейтронов, повышая поток с поверхности замедлителя (см. табл. 1). Водяная рамка со стороны 1-го канала шириной 6,5 см, толщиной 3,7 см, высотой 20,7 см позволяет сместить пик нейтронного спектра в область «тепловых» нейтронов (см. рис. 6). В результате расчетов нейтронно-физических характеристик, которые проводились методом Монте-Карло (программа MCNP) с использованием дискретных констант из библиотеки ENDF/B-VII, и с учетом технологической возможности изготовления комбинированного замедлителя был выбран вариант № 1. Компьютерное моделирование показало, что выигрыш в области нейтронов с длиной волны $4-\infty \text{ \AA}$ для выбранного варианта достигает 12 раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kulikov S., Shabalin E.* Complex of Neutron Moderators for the IBR-2M Reactor // Proc. of the 17th Meeting of the Intern. Collab. on Advanced Neutron Sources "ICANS-XVII", Santa Fe, New Mexico, April 25–29, 2005.
2. *Ананьев В. Д., Беляков А. А., Булавин М. В., Верхоглядов А. Е., Куликов С. А., Мухин К. А., Шабалин Е. П.* Холодный замедлитель нейтронов на модернизированном реакторе ИБР-2. Первые результаты пуска // ЖТФ. 2014. Т. 84, вып. 2.
3. Лаборатория нейтронной физики им. И. М. Франка Объединенного института ядерных исследований. <http://fnph.jinr.ru/ru/facilities/ibr-2/instruments>.
4. *Гундорин Н. А., Назаров В. М.* Эффективный замедлитель для импульсных источников нейтронов. Сообщ. ОИЯИ РЗ-80-721. Дубна, 1980.
5. *Chadwick M. B., Herman M., Obložinsky P. et al.* ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data // Nucl. Data Sheets. 2011. V. 112, No. 12. P. 2887–2996.

Получено 6 сентября 2017 г.