

О ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЙ С ОЧЕНЬ ХОЛОДНЫМИ НЕЙТРОНАМИ НА ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКАХ

*Ю. Н. Покотиловский*¹

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Рассматривается возможность исследований с очень холодными нейтронами (ОХН) на примере импульсного реактора ЛНФ ИБР-2. Кратко рассмотрены возможные области применения и особенности параметров реактора для таких исследований. Приводятся результаты детальных расчетов генерации ОХН в различных холодных замедлителях, транспорта ОХН в нейтронных волноводах и подавления вклада запаздывающих нейтронов.

The possibility of investigations with very cold neutrons (VCN) at the FLNP pulsed reactor IBR-2 is considered. Possible application areas and the reactor characteristics for these investigations are shortly described. The results of detailed calculations of the VCN generation in different cold moderators, VCN transport in neutron guides and suppression of contribution of delayed neutrons are outlined.

PACS: 28.20.-v; 28.20.Gd; 28.41.Pa; 29.27.Ac

ВВЕДЕНИЕ

Теоретические и экспериментальные работы по применению рассеяния нейтронов для исследования вещества (структура и динамика газов, жидкостей и твердых тел) вначале концентрировались в области тепловых нейтронов (5–100 мэВ) [1–3]. Затем постепенно сфера применения расширялась как в область холодных (1–5 мэВ), так и более быстрых — эпитепловых и электронвольтовых нейтронов [4]. В последние годы усиливается интерес к исследованиям с применением очень холодных нейтронов (ОХН) — с длиной волны больше 10 \AA (энергия ниже 1 мэВ).

Из общих соображений очевидно, что ОХН позволяют лучше исследовать материалы на больших характерных масштабах (100–1000 \AA) и больших временах. Информация о структуре и динамике может быть получена с помощью различных экспериментальных нейтронных методов: времяпролетной спектроскопии неупругого рассеяния высокого разрешения, спин-эхо спектроскопии, малоуглового рассеяния, рефлектометрии, дифракции, специально приспособленных к использованию длинноволновых нейтронов.

Можно привести некоторые из областей и экспериментальных методов, где применение ОХН может дать преимущества по сравнению с более коротковолновыми нейтронами.

¹E-mail: pokot@nf.jinr.ru

- В сложных молекулярных комплексах и в «мягкой материи» типичными являются медленные движения с характерной энергией, соответствующей диапазону энергий ОХН, поэтому спектрометрия неупругого рассеяния высокого разрешения с их применением может дать новую полезную информацию.

- Величина сечения рассеяния нейтронов на кластерах пропорциональна квадрату длины волны, это усиливает возможности исследования наноматериалов.

- Длинноволновая дифракция нейтронов применима при структурном анализе больших молекулярных комплексов, особенно биологической природы.

- Развитие нейтронной микроскопии и голографии возможно только с появлением достаточно интенсивных потоков ОХН.

- Сильный рост сечения захвата с уменьшением энергии приводит к бóльшей величине контраста поглощение/пропускание, что также существенно в нейтронной томографии.

Нейтронно-оптические инструменты могут лучше работать на длинных волнах благодаря бóльшему отклонению от единицы коэффициента преломления нейтронов в среде:

$$(n - 1) \approx (\lambda/\lambda_c)^2. \quad (1)$$

Здесь λ — длина волны нейтрона; $\lambda_c = (\pi/Nb)^{1/2}$ — критическая длина волны, соответствующая полному отражению нейтронов при всех углах падения; N — атомная плотность среды; b — длина когерентного рассеяния нейтрона в веществе. Отсюда следует расширение возможностей в нейтронной оптике.

- Угол полного отражения от зеркал пропорционален длине волны нейтронов, это обеспечивает лучшее отражение от зеркал, а от суперзеркал с большим m вплоть до углов $10-20^\circ$.

- Угол отклонения призмой пропорционален квадрату длины волны нейтронов, широкоугольные пучки могут быть лучше сфокусированы с помощью зеркал или линз на меньших длинах: фокальная длина обратно пропорциональна квадрату длины волны нейтрона.

- Благодаря бóльшей величине фазовых сдвигов нейтронных волн в веществе и магнитном поле (фазовый сдвиг пропорционален длине волны) ОХН более чувствительны к малому контрасту — это существенно расширяет возможности нейтронной томографии тонких образцов.

В нейтронной интерферометрии важно обеспечить достаточно большие длины когерентности: продольной и поперечной, этого легче достигнуть в длинноволновой области нейтронного спектра.

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ИБР-2

Экспериментальная техника рассеяния нейтронов на импульсных источниках имеет свою специфику (см. недавний обзор [5]). Работа с ОХН на импульсном пучке нейтронов реактора ИБР-2 имеет дополнительные особенности: положительные и отрицательные. К положительным надо отнести, в первую очередь, большой интервал между импульсами — 200 мс. Такая большая длительность позволяет, например, на длине пролетной базы 10–12 м измерять времяпролетные спектры без наложения нейтронов от последовательных реакторных импульсов вплоть до скоростей нейтронов 50–100 м/с (длина волны нейтронов 40–80 Å).

Большая длительность реакторной вспышки ИБР-2 ~ 240 мкс сильно ограничивает энергетическое разрешение при спектрометрии тепловых и холодных нейтронов (длительность импульса тепловых нейтронов составляет ~ 300 мкс) и требует для улучшения разрешения вводить дополнительные устройства, например фурье-чопперы для структурной нейтронографии высокого разрешения [6]. Для диапазона энергий ОХН ИБР-2 благодаря малой скорости нейтронов дает возможность получить неплохое разрешение — порядка микроэлектронвольт — на сравнительно коротких пролетных базах: 10–15 м. С другой стороны, характерное время вытекания ОХН из холодных замедлителей, оптимизированных по максимальному выходу ОХН, как показывают расчеты, на порядок превышает длительность импульса известных импульсных нейтронных источников с коротким импульсом (см. таблицу), но близко к длительности импульса реактора ИБР-2. Для нейтронных источников с короткой вспышкой (20–30 мкс для источников спалейшн-типа) большое время вытекания ОХН из оптимального по толщине холодного замедлителя полностью уничтожает преимущество короткой вспышки или вынуждает использовать тонкие замедлители с заметно уменьшенным выходом нейтронов.

Импульсные источники тепловых нейтронов

Название, страна	$\Phi_{\max},$ $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$\delta t,$ мкс	Частота, с^{-1}	Импульсный флюенс, см^{-2}
ISIS I, Великобритания	10^{15}	25	50	$\sim 2,5 \cdot 10^{10}$
ISIS II, Великобритания	$4,5 \cdot 10^{15}$	25	5	$\sim 1,1 \cdot 10^{11}$
MLNSC, США	$7 \cdot 10^{14}$	25	20	$\sim 1,75 \cdot 10^{10}$
SNS, США	$1,2 \cdot 10^{15}$	20–50	60	Макс. $6 \cdot 10^{10}$
STS, США (проект)	$5 \cdot 10^{15}$	20–200	10	Макс. 10^{12}
JSNS, Япония	$2/6,5 \cdot 10^{15}$	20–50	25	Макс. $3,25 \cdot 10^{11}$
Donguan, Китай	$\sim 5 \cdot 10^{14}$	20–50	25	Макс. $2,5 \cdot 10^{10}$
ИБР-2, Россия	$\sim 6 \cdot 10^{15}$	310	5	$\sim 1,85 \cdot 10^{12}$
ESS, Швеция (проект)	$(5-7,5) \cdot 10^{15}$	2800	14	Макс. $2,1 \cdot 10^{13}$

Третья отличительная черта ИБР-2 — большой фон запаздывающих нейтронов ($\sim 8\%$ от средней мощности) — представляет самую серьезную проблему для работы с ОХН. Основной поток в спектре запаздывающих нейтронов на ИБР-2 составляют быстрые и эпитепловые нейтроны. Их подавление на выходе нейтронных труб, как известно, достигается выбором соответственно уменьшенного радиуса кривизны и ширины нейтронной трубы. Однако и в спектре ОХН, холодных и тепловых нейтронов, каналирующих по криволинейному нейтронному каналу, естественно присутствуют запаздывающие нейтроны с тем же спектром и в значительном количестве. В максвелловском спектре поток холодных нейтронов пропорционален λ^{-5} и при больших длинах волн нейтронов поток запаздывающих тепловых нейтронов на ИБР-2 из нейтронной трубы превышает поток ОХН. Рис. 1 показывает рассчитанное отношение интенсивности нейтронов в нормированном максвелловском спектре холодных нейтронов

$$\Phi(\lambda) = \frac{2\lambda_0^4}{\lambda^5} e^{-(\lambda_0/\lambda)^2}, \quad (2)$$

где $\lambda_0 = 5 \text{ \AA}$, к постоянному фону запаздывающих нейтронов. Из графика видно, что на краях спектра, особенно в интересующем нас длинноволновом диапазоне, фон запазды-

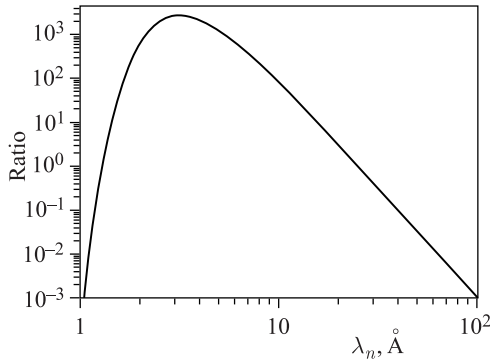


Рис. 1. Рассчитанное отношение спектральной интенсивности нейтронов в нормированном максвелловском спектре к постоянному суммарному по спектру потоку запаздывающих нейтронов

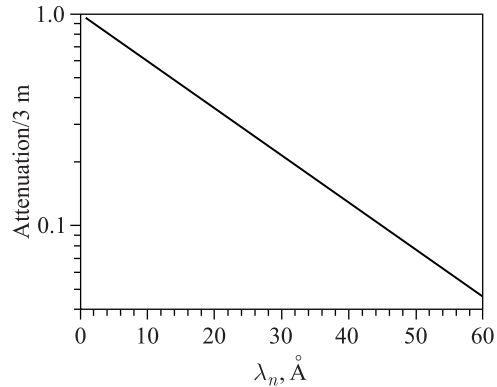


Рис. 2. Рассчитанное ослабление воздушным промежутком длиной 3 м пучка нейтронов в зависимости от длины волны нейтронов

вающих нейтронов составляет значительную часть интенсивности или даже превышает поток нейтронов в максвелловском спектре. Это заставляет специально подбирать параметры нейтронвода для вывода нейтронов на исследуемый образец: радиус кривизны, ширину и длину, а также вводить специальный прерыватель, сфазированный с импульсами реактора и расположенный близко к поверхности холодного замедлителя, с целью максимального подавления вклада запаздывающих нейтронов. Для подавления запаздывающих нейтронов, каналирующих по нейтронводу, рассчитанному для транспортировки ОХН, этот прерыватель может быть выполнен легким, малогабаритным, из тонкого листа сильнопоглощающего нейтроны материала: гадолиния или бора.

Кроме того, конструктивно длинный воздушный промежуток между замедлителями и входом в нейтронводы на реакторе ИБР-2 (~ 3 м) сильно ослабляет поток ОХН. На рис. 2 показан результат расчета коэффициента ослабления нейтронов воздухом, расчет основан на измеренных сечениях ОХН на азоте [7] и соотношении сечений когерентного рассеяния на азоте и кислороде [8]. Из рис. 2 видно, что поток нейтронов с длиной волны 30 \AA ослабляется на длине 3 м в пять раз. Поэтому для получения максимального потока ОХН вход в нейтронвод желательно размещать ближе к холодному замедлителю. Перечисленные особенности определяют требования к геометрии и конструкции установки для получения и вывода ОХН на образец.

Первые предложения («О некоторых возможностях исследований с очень холодными нейтронами на импульсных источниках» [9]) и соответствующий проект для ИБР-2 были представлены более 30 лет назад. Однако по разным причинам, в числе которых было и отсутствие холодного источника нейтронов, в то время проект по генерации и транспортировке очень холодных нейтронов не был реализован. К настоящему времени в лаборатории накоплен опыт разработки и эксплуатации холодных источников: твердого метанового [10, 11] и шарикового мезитиленового [12–16] на модернизированном импульсном реакторе ИБР-2М [17]. К тому же и на Западе в нейтронных лабораториях в последние годы начал проявляться интерес к длинноволновой области спектра нейтронов. В Аргоннской лаборатории в США (ANL) в 2005 г. [18] и в следующем

году в Институте Пауля Шеррера (PSI) в Швейцарии [19] были проведены специальные совещания по анализу состояния и перспектив исследований с очень холодными нейтронами.

Сейчас в мире имеется несколько специализированных установок для вывода очень холодных нейтронов.

Вертикальный канал ОХН на высокопоточном реакторе в Институте Лауэ–Ланжевена в Гренобле [20] выводит узкий спектр нейтронов в районе длины волны $\sim 40 \text{ \AA}$ и используется, в основном, для работ по нейтронной длинноволновой интерферометрии. На реакторе FRM-II в Гархинге (Германия) построен комплекс MIRA, включающий нейтронород со спектром ОХН в диапазоне $8\text{--}30 \text{ \AA}$ и набор инструментов для рефлектметрии, малоуглового рассеяния и поляризационного анализа при работе с поляризованными нейтронами [21].

Как показано далее, импульсный реактор ИБР-2 является наиболее подходящим импульсным нейтронным источником для генерации и времяпролетной спектрометрии ОХН.

2. РАСЧЕТЫ ГЕНЕРАЦИИ И ТРАНСПОРТА ОХН НА ИБР-2

Далее представлены результаты детальных расчетов генерации и транспортировки ОХН на 3-м канале реактора ИБР-2. Расчеты (с использованием программы MCNP) проведены в несколько упрощенной (цилиндрической) модели активной зоны реактора, замедлителей и поглотителей между ними, но со строгим соблюдением всех основных размеров элементов геометрии, промежутков и оболочек. Проверка надежности используемой модели иллюстрируется рис. 3, где показано сравнение спектров нейтронов на расстоянии 30 см от водяного замедлителя, рассчитанного в данной работе и измеренного в работе [22]. Различие спектров невелико и примерно таково, что и разница рассчитанных и измеренных спектров в [22].

Конфигурация расположения холодных замедлителей соответствует принятой для холодных замедлителей на ИБР-2 [10–16]: предзамедлителем служит оптимизированный по

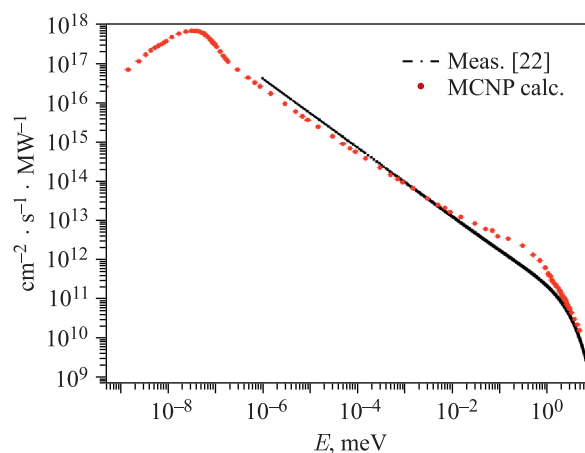


Рис. 3. Сравнение спектров нейтронов на расстоянии 30 см от водяного замедлителя: рассчитанного в данной работе и измеренного в работе [22]

толщине (4 см) водяной замедлитель, холодный замедлитель расположен вблизи предзамедлителя, при этом вводились соответствующие (алюминиевые) оболочки замедлителей толщиной 3 мм и вакуумные промежутки (5 мм) между замедлителями. Все замедлители в этих модельных расчетах имели форму цилиндров диаметром 20 см, в части расчетов вокруг замедлителей вводился дополнительный водяной отражатель в форме цилиндра толщиной 4 см и высотой по отношению к внешней поверхности холодного замедлителя, равной 12 см.

В качестве холодных замедлителей в расчетах тестировались мезитилен [12–16], твердый метан [10, 11] и жидкий параводород. Детальные расчеты зависимости плотности тока ОХН с поверхности мезитиленового замедлителя при плотности 0,4 г/см³ (шариковый замедлитель) от толщины показали, что эта зависимость слаба в интервале толщин 4–8 см, оптимальной выбрана толщина 4 см. Результат такого же расчета для метана показан на рис. 4; видно, что наибольший выход ОХН достигается при толщине 4 см. Плотность метана в этих расчетах принималась равной 0,26 г/см³, а мезитилена 0,4 г/см³, что соответствует половинной плотности замедлителей при этой температуре ввиду использования шариковых замедлителей [12–16]. Для параводорода ($T = 20$ К, плотность 0,072 г/см³) зависимость тока ОХН с поверхности слабая в интервале толщин 4–6 см.

Рис. 5 показывает рассчитанные спектры плотности тока нейтронов на выходе различных замедлителей оптимальной толщины 4 см: воды, мезитилена, метана, параводорода. В этих расчетах вводился упомянутый выше дополнительный водяной цилиндрический отражатель вокруг замедлителей; при его отсутствии все интенсивности нейтронов уменьшались примерно в два раза. Так как жидкий водород не может быть использован на ИБР-2 из соображений безопасности, наилучшим по производительности холодным замедлителем, согласно проведенным расчетам, является твердый метан в шариковом варианте.

В выборе параметров криволинейного нейтронновода для ОХН определяющими являются два фактора: максимальное подавление потока быстрых, эпитепловых и тепловых

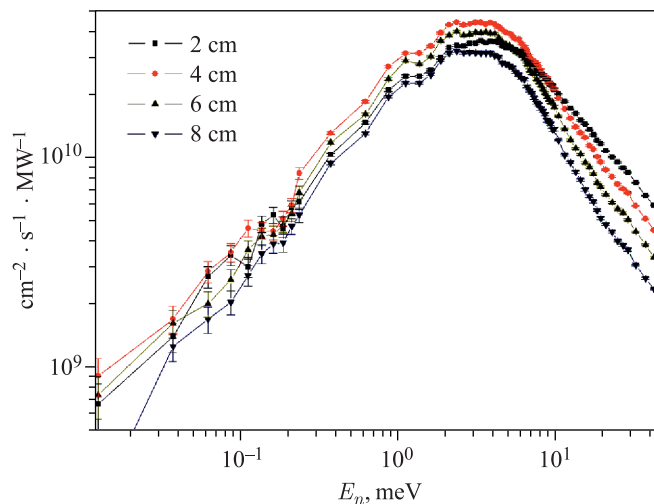


Рис. 4. Рассчитанные спектры нейтронов вблизи метанового замедлителя при 22 К (плотность 0,26 г/см³) в зависимости от толщины замедлителя

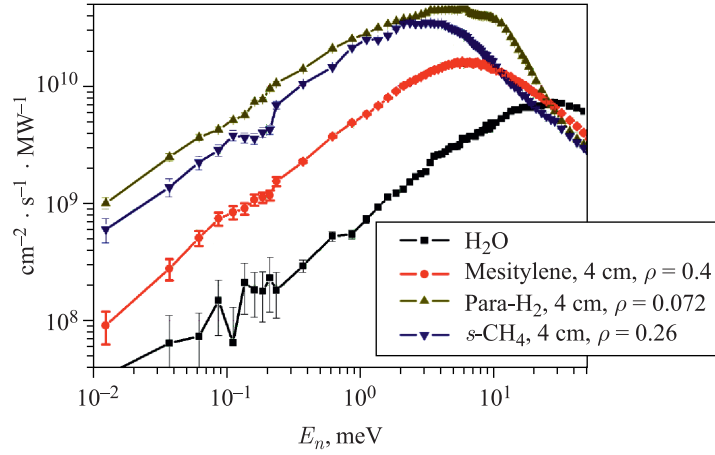


Рис. 5. Рассчитанные спектры нейтронов вблизи различных холодных замедлителей оптимальной толщины 4 см: воды, мезитилена, метана, параводорода

запаздывающих нейтронов и эффективный захват и каналирование ОХН. В процессе моделирования были рассчитаны пропускание нейтронов и фон запаздывающих нейтронов в разных вариантах радиуса кривизны, ширины и высоты нейтронновода: это радиусы 300, 200, 150, 125 и 100 м, высоты 6 и 10 см и ширины 6, 4, и 2 см. Рис. 6 свидетельствует об оказании влияния кривизны нейтронновода на интенсивность запаздывающих нейтронов на выходе нейтронновода длиной 8 м, шириной 4 см и высотой 10 см для разных радиусов кривизны нейтронновода. Расчеты проводились методом Монте Карло (MCNP), в котором отсутствовало каналирование нейтронов по нейтронноводу путем зеркального отражения от его поверхности. Расчеты показали, что при выбранной длине нейтронновода 8 м фон запаздывающих нейтронов начинает эффективно подавляться начиная с

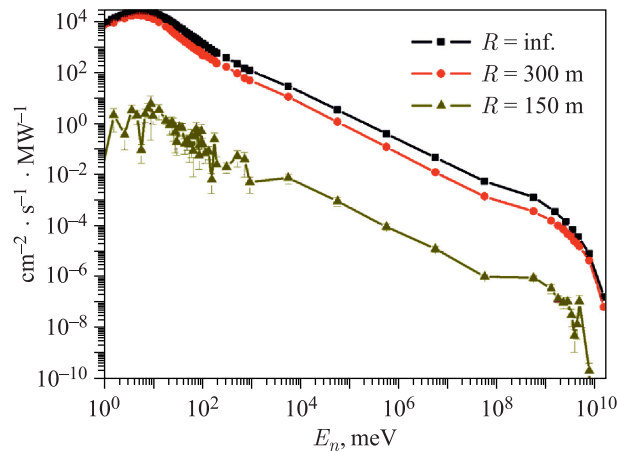


Рис. 6. Рассчитанные спектры запаздывающих нейтронов на выходе нейтронновода при длине $L = 8$ м, ширине $a = 4$ см, высоте $h = 10$ см и разных радиусах кривизны

радиуса кривизны 150 м. При радиусе 300 и 200 м подавление запаздывающих нейтронов недостаточно, а при переходе от 150 м к 125 и 100 м дальнейший эффект их подавления незначителен, но при этом более существенно ограничивается спектр ОХН.

Коэффициент прохождения нейтронов через криволинейный нейтронотвод в зависимости от энергии нейтронов E имеет вид

$$T_0(E, \rho) = \frac{2E^*}{3E} \quad (E > E^*); \quad T_0(E, \rho) = \frac{2E^*}{3E} \left[1 - \left(1 - \frac{E}{E^*} \right)^{3/2} \right] \quad (E < E^*), \quad (3)$$

где ρ — радиус кривизны нейтронотвода; $E^* = \rho E_b / 2a$ — критическая энергия; E_b и a — граничная энергия и ширина нейтронотвода.

Коэффициент захвата нейтронов в каналирование по зеркальному нейтронотводу определяется формулой

$$K = 4\theta_c^2 \times K_a \times K_h, \quad K_{a,h} = 1 + (\theta_c/\theta_0)^2 \quad (\theta_c \leq \theta_0); \quad K_{1,2} = 2\theta_c/\theta_0 \quad (\theta_c \geq \theta_0). \quad (4)$$

Здесь $\theta_c = (E_b/E)^{1/2}$, $\theta_0 = a/L$ для ширины нейтронотвода a и $\theta_0 = h/L$ для высоты нейтронотвода h при длине нейтронотвода L .

Рис. 7 показывает рассчитанные спектры нейтронов на выходе нейтронотвода длиной 8 м ($\rho = 150$ м, $a = 4$ см, $h = 10$ см) из метанового и мезитиленового замедлителей, за исходные данные брались спектры на выходе из замедлителей на рис. 5 и коэффициент захвата в нейтронотвод и каналирования согласно уравнениям (3) и (4). В расчете предполагалась идеально гладкая поверхность нейтронотвода.

Рис. 8 иллюстрирует распределение тока нейтронов по поверхности метанового замедлителя в разных энергетических интервалах нейтронов: 0–0,1 мэВ, 0,25–0,5 мэВ, 1–1,25 мэВ и 4,75–5 мэВ. Видно, что плотность тока распределена довольно равномерно, это существенно для эффективного захвата нейтронов в каналирование в широком диапазоне углов отражения от поверхности нейтронотвода.

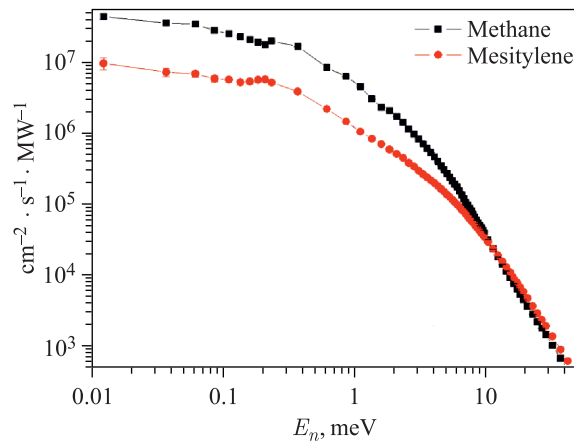


Рис. 7. Рассчитанные спектры нейтронов на выходе нейтронотвода ($\rho = 150$ м, $a = 4$ см, $h = 10$ см) из метанового замедлителя ($T = 22$ К, плотность $0,26$ г/см³) и мезитиленового замедлителя ($T = 20$ К, плотность $0,4$ г/см³)

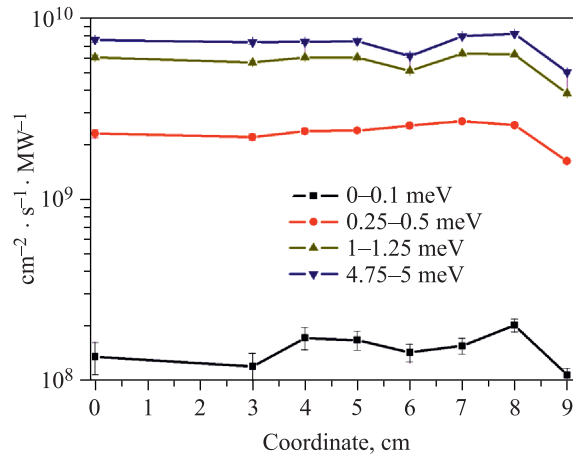


Рис. 8. Рассчитанные распределения плотности тока нейтронов на поверхности метанового замедлителя ($T = 22$ К, плотность $0,26$ г/см³) в разных энергетических интервалах: 0–0,1 мэВ, 0,25–0,5 мэВ, 1–1,25 мэВ и 4,75–5 мэВ, в зависимости от расстояния от центра замедлителя

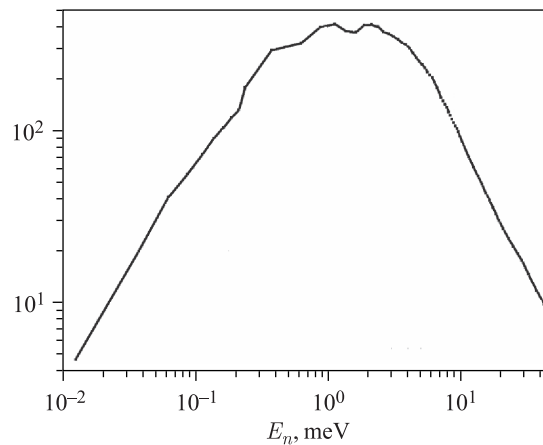


Рис. 9. Рассчитанное на основе данных рис. 7 отношение спектральной интенсивности нейтронов на выходе нейтропровода с $\rho = 150$ м, $a = 4$ см, $h = 10$ см из метанового замедлителя ($T = 22$ К, плотность $0,26$ г/см³) к суммарной по спектру постоянной интенсивности каналирующих запаздывающих нейтронов

На рис. 9 показано рассчитанное на основе данных рис. 7 для метанового замедлителя отношение интенсивности нейтронов в спектре ОХН к постоянному потоку запаздывающих нейтронов. Благодаря выбранной конфигурации криволинейного нейтропровода это соотношение значительно лучше, чем показанное на рис. 1, но, тем не менее, требует введения легкого сфазированного прерывателя вблизи поверхности замедлителя.

Как было отмечено выше, время вытекания нейтронов из оптимальных по потоку ОХН замедлителей сильно зависит от энергии нейтронов. Это иллюстрируется рис. 10,

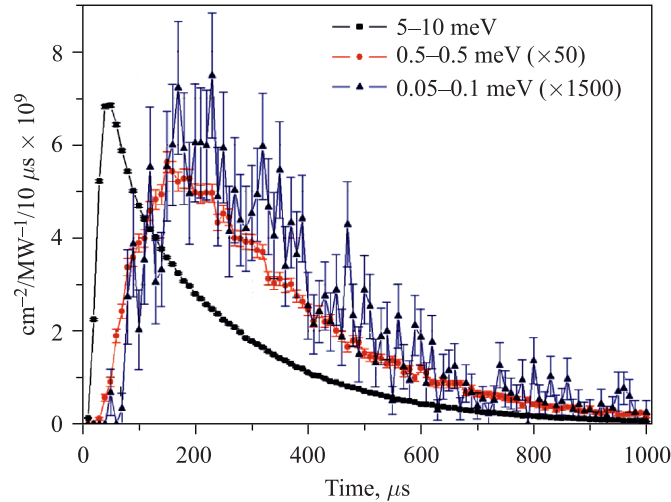


Рис. 10. Временная зависимость вытекания нейтронов из метанового замедлителя для разных энергетических интервалов

где показаны рассчитанные кривые вытекания из метанового замедлителя для разных энергий нейтронов: в диапазоне 5–10 мэВ, 0,1–0,5 мэВ и 0,05–0,1 мэВ. Для более медленных нейтронов времена вытекания значительно превосходят время импульса тепловых нейтронов в реакторе ИБР-2. При отсутствии дополнительного водяного отражателя вокруг замедлителей времена вытекания ОХН уменьшались примерно на 30 %. Подобные кривые вытекания были вычислены и для других замедлителей ОХН: мезитилена и параводорода — они демонстрируют те же зависимости.

При таких больших временах вытекания ОХН из холодного замедлителя более важным параметром является не столько интенсивность нейтронов в замедлителе в максимуме вспышки, сколько полный флюенс нейтронов за вспышку. По этому параметру ИБР-2 не имеет равных среди существующих импульсных источников тепловых нейтронов (см. последнюю колонку в таблице).

Важной проблемой в транспортировке ОХН является обеспечение максимальной гладкости поверхности нейтроновода, так как из-за широкого угла захвата ОХН испытывают по сравнению с более коротковолновыми нейтронами много отражений. Наиболее обещающими в этом отношении выглядят так называемые «реплика-нейтроноводы», получаемые термическим или электрохимическим методом нанесения на поверхность флюат-стекла отражающего нейтроны металла с последующим его удалением со стекла в виде фольги. Такой нейтроновод был впервые применен для транспорта ОХН в вертикальном канале установки [20]. Нейтроновод показал хорошую проводимость ОХН и стабильность в условиях сильной радиационной нагрузки. В дальнейшем такие нейтроноводы исследовались на возможность транспортировки ультрахолодных нейтронов [23–26], однако систематического исследования отражающих и транспортных свойств этих нейтроноводов для ОХН в функции длины волны и угла падения нейтронов не проводилось. Для сооружения нейтроновода ОХН, удовлетворяющего высоким требованиям по транспортировке нейтронов, такие предварительные исследования необходимы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Турчин В. Ф. Медленные нейтроны. М.: Атомиздат, 1963 (*Turchin V.F. Slow Neutrons. Jerusalem: IPST, 1965*).
2. Рассеяние тепловых нейтронов. М.: Атомиздат, 1970 (*Thermal Neutron Scattering. London; New York: Acad. Press. 1965*).
3. Marshall W., Lovesey S.W. Theory of Thermal Neutron Scattering: The Use of Neutrons for the Investigation of Condensed Matter. Clarendon Press, 1971.
4. Neutron Scattering Application and Techniques. 6 V. Springer Nature, 2009–2017.
5. Аксенов В. Л. // УФН. 2009. Т. 179, № 4. С. 434.
6. Балагуров А. М. // ЭЧАЯ. 2015. Т. 46, вып. 3. С. 453;
Аксенов В. Л., Балагуров А. М. // УФН. 2016. Т. 186, № 3. С. 293.
7. Степанов С. Б., Житарев В. Е., Моторин А. М., Шаранин Ю. В. // АЭ. 1983. Т. 55. С. 403.
8. Institut Laue–Langevin. Neutron Data Booklet. Grenoble, 2002.
9. Покотиловский Ю. Н. Сообщ. ОИЯИ Р3-84-810. Дубна, 1984.
10. Шабалин Е. П. // ЭЧАЯ. 2005. Т. 36, вып. 6. С. 1425.
11. Belyakov A. A., Melikhov V. V., Peryolyshev Yu. N., Shabalin E. P. // J. Neutr. Res. 1996. V. 3. P. 209.
12. Shabalin E. P. // Proc. of the 6th Intern. Workshop on UCN&CN Physics and Sources, St. Petersburg, Moscow, July 1–7, 2007.
13. Куликов С. А., Калинин И. В., Морозов В. М., Новиков А. Г., Пучков А. В., Черников А. Н., Шабалин Е. П. // Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т. 7, № 1(157). С. 95.
14. Shabalin E., Kulikov S. // Neutron News. 2011. V. 22, Iss. 2. P. 28;
Ананьев В. Д., Беляков А. А., Булавин М. В., Верхоглядов А. Е., Кулагин Е. Н., Куликов С. А., Кустов А. А., Любимцев А. А., Мухин К. А., Петухова Т. Б., Сиротин А. П., Федоров А. Н., Шабалин Е. П., Шабалин Д. Е., Широков В. К. Сообщ. ОИЯИ Р13-2012-113. Дубна, 2012.
15. Kulikov S., Belyakov A., Bulavin M., Mukhin K., Shabalin E., Verhoglyadov A. // Part. Nucl. 2013. V. 10, No. 2(179). P. 230.
16. Ananiev V., Belyakov A., Bulavin M., Kulagin E., Kulikov S., Mukhin K., Petukhova T., Sirotnin A., Shabalin D., Shabalin E., Shirokov V., Verhoglyadov A. // Nucl. Instr. Meth. B. 2014. V. 320. P. 70; J. Phys. Conf. Ser. 2016. V. 746. P. 012031.
17. Ананьев В. Д., Виноградов А. В., Долгих А. В., Едунов Л. В., Пепельшев Ю. Н., Рогов А. Д., Заикин А. В. Сообщ. ОИЯИ Р13-2012-42. Дубна, 2012.
18. Proc. of Workshop on Applications of Very Cold Neutrons Source, Argonne, Illinois, USA, Aug. 21–24, 2005. Argonne Nat. Lab., 2005.
Micklich B. J., Carpenter J. M. // Ibid. ANL-05-42.
19. Intern. Workshop on Present Status and Future of Very Cold Neutron Applications, PSI, Switzerland, Feb. 13–14, 2006.
20. Steyerl A., Nagel H., Schreiber F.-X., Steinhauser K.-A., Gahler R., Gläser W., Ageron P., Astruc J.-M., Drexel N., Gervais R., Mampe W. // Phys. Lett. A. 1986. V. 116. P. 347.
21. Georgii R., Seemann K. // J. Large-Scale Res. Facilities. A. 2015. V. 3. P. 1;
Georgii R., Arend N., Böni P., Lamago D., Mühlbauer S., Pfeiderer C. // Neutron News. 2007. V. 18. P. 25;
Georgii R., Böni P., Janoschek M., Schanzer C., Valloppilly S. // Physica B. 2007. V. 397. P. 150.
22. Шабалин Е. П., Верхоглядов А. Е., Булавин М. В., Рогов А. Д., Кулагин Е. Н., Куликов С. А. // Письма в ЭЧАЯ. 2015. Т. 12, № 2(193). С. 505.

23. *Kawabata Y., Suzuki M., Tasaki S., Somemiya K.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V. 420. P. 70.
24. *Plonka C., Geltenbort P., Soldner T., Häse H.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2007. V. 578. P. 450.
25. *Frei A., Schreckenbach K., Franke B., Hartmann F.J., Huber T., Picker R., Paul S., Geltenbort P.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2010. V. 612. P. 349.
26. *Wlokka S., Fierlinger P., Frei A., Geltenbort R., Huber T., Schreckenbach K., Stoepler R.* // J. Neutr. Res. 2015. V. 18. P. 109; arXiv: 1701.0743 [physics.ins-det]. 2017.

Получено 23 июня 2017 г.