

## ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ ХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ НА МАКЕТЕ КРИОГЕННОГО ЗАМЕДЛИТЕЛЯ РЕАКТОРА ИБР-2М

*С. А. Куликов<sup>а</sup>, И. В. Калинин<sup>б</sup>, В. М. Морозов<sup>б</sup>, А. Г. Новиков<sup>б</sup>,  
А. В. Пучков<sup>б</sup>, А. Н. Черников<sup>а</sup>, Е. П. Шабалин<sup>а</sup>*

<sup>а</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>б</sup> ГНЦ РФ — Физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского, Обнинск, Россия

Излагаются методика и результаты эксперимента по определению спектра холодных нейтронов из твердого мезитилена при температурах замедлителя 10–50 К. Работа проводилась на спектрометре ДИН-2ПИ реактора ИБР-2. Целью работы была проверка системы констант, используемой при монте-карло-моделировании криогенных замедлителей нейтронов реактора ИБР-2М, а также получение зависимости интенсивности выхода холодных нейтронов от температуры замедлителя. Получено удовлетворительное согласие экспериментальных и расчетных спектров нейтронов при температуре мезитилена 20 К; отношение интенсивностей холодных нейтронов при температуре 10 и 50 К равно  $\sim 1,8$ .

The article is dedicated to methods and results of experimental determination of cold neutron spectra from solid mesitylene at neutron moderator temperatures 10–50 K. Experiments were fulfilled at DIN-2PI spectrometer of the IBR-2 reactor. The main goals of this work were to examine a system of constants for Monte Carlo calculation of cryogenic moderators of the IBR-2M reactor and to determine the temperature dependence of cold neutron intensity from the moderator. A reasonable agreement of experimental and calculation results for mesitylene at 20 K has been obtained. The cold neutron intensity at temperature of moderator 10 K is about 1.8 times higher than at  $T = 50$  K.

PACS: 29.25.Dz, 61.05.fg, 34.50.Ez, 28.41.i, 28.50.k

### ВВЕДЕНИЕ

В процессе создания криогенного замедлителя для реактора ИБР-2 на основе твердого мезитилена в качестве замедляющей среды [1, 2] возник вопрос об экспериментальной проверке характеристик этого замедлителя, полученных расчетным путем методом монте-карло-моделирования с использованием программы MNCP и библиотеки констант для мезитилена, разработанных в группе проф. Р. Гранады [3] с использованием, в частности, экспериментальных данных д-ра И. Натканца [4]. Упомянутую проверку было решено провести на времяпролетном спектрометре неупругого рассеяния ДИН-2ПИ [5]. После проведения ряда предварительных экспериментов и с учетом их результатов было решено, что наиболее прямым и представительным вариантом такой проверки в условиях спектрометра ДИН-2ПИ будет измерение спектров нейтронов, испускаемых пластиной, близкой по размерам к реальному замедлителю, наполненной мезитиленом варьируемой

криогенной температуры, при облучении его монохроматическими нейтронами нескольких тепловых энергий. Это давало бы возможность оценить реальную чувствительность спектра холодных нейтронов, формирующихся в замедлителе, относительно температуры, а также влияние на этот спектр различных энергий нейтронов источника, падающих на замедлитель.

Итак, задача данной работы состояла в том, чтобы:

— получив экспериментально реальный спектр, формирующийся в замедлителе при криогенных температурах, сравнить его с расчетом и тем самым оценить надежность системы констант, используемых для предсказания характеристик криогенного замедлителя;

— понять чувствительность низкоэнергетической области спектра к температуре замедлителя, которая существенным образом зависит от режима работы холодильной установки, используемой в системе криогенного замедлителя, и тем самым сделать выводы об оптимальном режиме использования этой системы.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТ

Общая схема эксперимента представлена на рис. 1. Алюминиевая кассета размерами  $120 \times 60 \times 20$  мм (напомним: это близко к размерам реального замедлителя), наполняемая мезитиленом, вместе с криогенным устройством помещалась в центре камеры образца спектрометра и располагалась под углом  $45^\circ$  к оси нейтронного пучка. Мезитилен охлаждался до желаемой температуры. Спектры, излучаемые поверхностью кассеты, регистрировались детекторами, расположенными в направлениях, близких к нормали к ее излучающей поверхности.

В экспериментах были использованы четыре значения энергии монохроматических нейтронов, падающих на кассету: 10, 30, 50 и 100 мэВ. При каждой из этих энергий

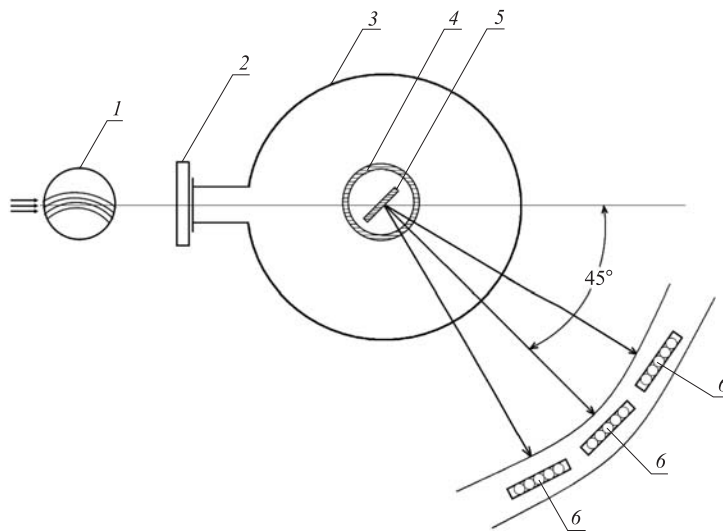


Рис. 1. Общая схема эксперимента: 1 — основной прерыватель; 2 — мониторная камера; 3 — вакуумированная камера образца; 4 — криогенное устройство; 5 — кассета с мезитиленом; 6 — кассеты детекторов, в которых регистрируются нейтронные спектры, испускаемые мезитиленом

измерения ее излучаемых спектров проводились при температурах кассеты 10, 30, 50, 100 К (данные при 100 К оказались несколько ограниченными).

Экспериментальная процедура включала в себя измерения спектров, излучаемых кассетой пустой и наполненной мезитиленом, а также с нейтронным пучком, перекрытым пластиной кадмия. Относительная нормировка спектров, полученных в различных экспериментальных циклах, проводилась на основе данных мониторинговой камеры. При обработке результатов в измеренные спектры была введена поправка на эффективность детекторов, так что в конечном итоге мы имели в своем распоряжении спектры потока нейтронов, излучаемых поверхностью интересующего нас замедлителя.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ

**2.1. Спектры, излучаемые замедлителем.** Полученные нами результаты, т. е. спектры нейтронов, испускаемые кассетой, наполненной мезитиленом при различных криогенных температурах и разных начальных энергиях нейтронов, облучающих ее, показаны на рис. 2.

Из рисунка видна явная температурная зависимость формы и амплитуды низкоэнергетической области спектра нейтронов, в то же время эта область спектра слабо зависит от энергии нейтронов источника. Из рисунка видно также, что низкоэнергетическая область спектра ( $E < 10$  мэВ) неплохо совпадает с кривой, рассчитанной для мезитилена при

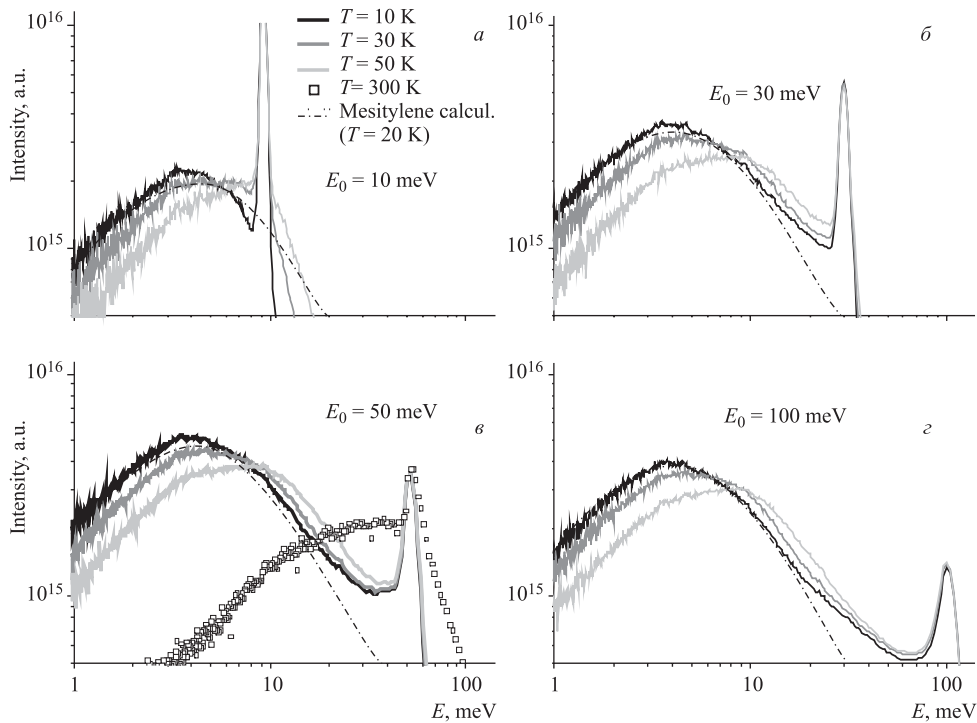


Рис. 2. Спектры, испускаемые холодным мезитиленом

температуре 20 К [6]. При более высоких энергиях такого согласия уже нет. Высокоэнергетическая часть экспериментального спектра спадает круче, чем это предсказывает расчет, причем тем круче, чем ниже энергия нейтронов источника. Можно предположить, что в условиях криогенных температур при выбранных энергиях нейтронов источника вероятность для них участвовать в процессах рассеяния с приобретением энергии крайне мала.

Во всех экспериментальных кривых рис. 2 видны особенности, присутствующие в спектрах примерно на энергиях, соответствующих таковым для падающих на кассету нейтронов. Они представляют собой остатки монолиний нейтронов, прошедших через замедлитель с небольшим числом рассеяний почти без обмена энергией со средой. Тем не менее по сравнению с первичными монолиниями они оказываются уширенными и, к сожалению, заметно деформируют естественную форму спектров в окрестностях соответствующих энергий.

Хотя, как отмечалось выше, форма низкоэнергетической области спектра не чувствительна к энергии нейтронов источника, однако можно полагать, что спектральной картине, которая будет иметь место в случае реального замедлителя, ближе всего спектр, соответствующий падающей энергии  $E_0 = 50$  мэВ, так как эта энергия наиболее близка к предполагаемой средней энергии тепловых нейтронов, поступающих из предзамедлителя комнатной температуры в криогенную часть замедлителя.

## 2.2. Факторы выигрыша (ФВ). Факторы выигрыша оценивались двумя путями:

— как отношение интенсивностей спектра при криогенных и комнатной температурах (рис. 3);

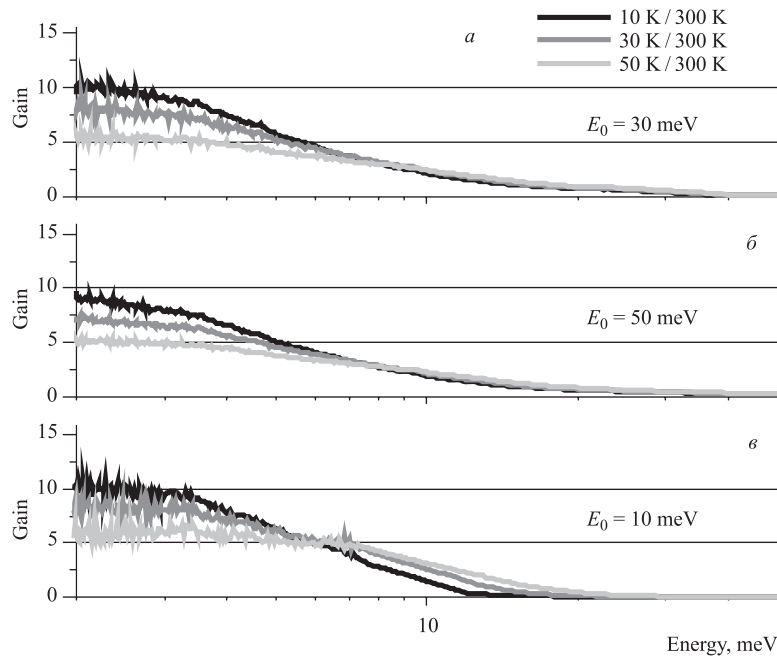
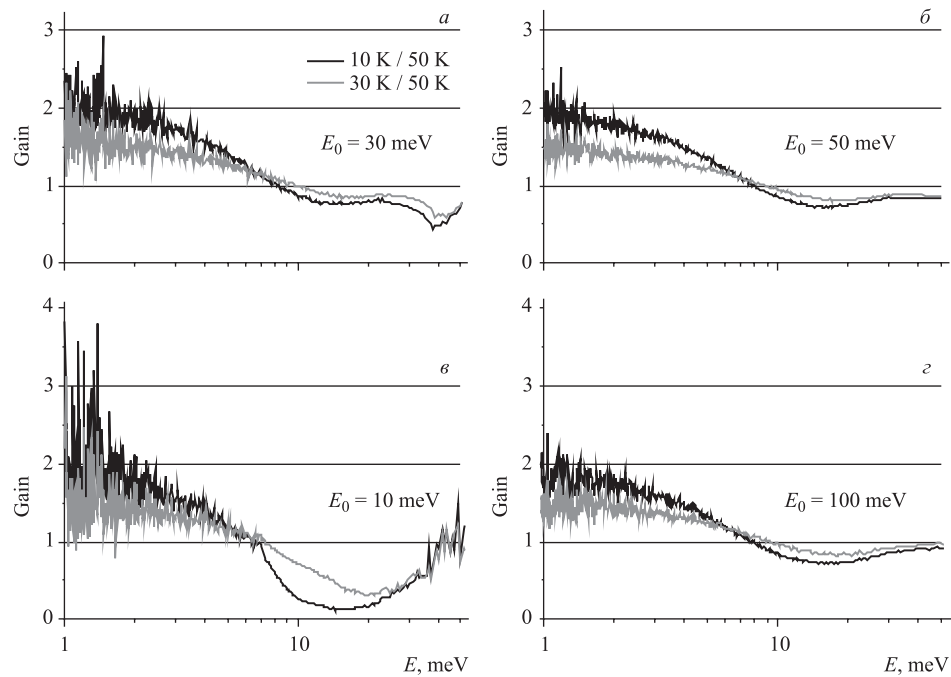


Рис. 3. Фактор выигрыша  $I(T, \text{мезитилен})/I(300 \text{ К}, \text{мезитилен})$

Рис. 4. Фактор выигрыша  $I(T, \text{мезитилен}) / I(50 \text{ К, мезитилен})$ 

— как отношение интенсивностей спектров при 10 и 20 К к их интенсивности при 50 К (рис. 4).

Из рис. 3 и 4 следует слабая зависимость фактора выигрыша (ФВ) от энергии нейтронов источника (с учетом неопределенностей, связанных со статистикой). Согласно рис. 4 максимальное значение ФВ в области низких энергий ( $E \sim 1\text{--}2$  мэВ) при  $T = 10$  К составляет  $\sim 10$ . В то же время максимальный расчетный ФВ мезитиленового замедлителя реактора ИБР-2М при 20 К относительно водяного замедлителя комнатной температуры реактора ИБР-2 в области спектра при  $E \sim 1$  мэВ составляет  $\sim 16,8$  [1]. Для корректного сравнения результатов эксперимента и расчетов необходимо внести поправку в расчетное значение ФВ за счет того, что плотность потока нейтронов в замедлителе реактора ИБР-2М в 1,7 раза выше, чем в реакторе ИБР-2. В этом случае расчет удовлетворительно согласуется с экспериментом.

В приводимой ниже таблице, составленной на основе рис. 4, представлены данные по температурной зависимости интенсивности спектра нейтронов в области энергий нейтронов около 2 мэВ при переходе между несколькими криогенными температурами. Видно, что переход  $10 \rightarrow 30$  К понижает интенсивность нейтронного потока на  $\sim 20\%$ , тогда как переход  $30 \rightarrow 50$  К приводит к потере  $\sim 30\%$  интенсивности. Таким образом, в области температур ниже 30 К производная  $dI/dT$  менее крутая, чем в области 30–50 К. Это обстоятельство полезно иметь в виду при выборе оптимального режима работы криогенной системы замедлителя.

**Отношение интенсивностей нейтронного потока при энергии  $\sim 2$  мэВ для нескольких значений температуры мезитиленового замедлителя**

Энергия падающих нейтронов $E_0$ , мэВ	$I(10\text{ К})/I(30\text{ К})$	$I(30\text{ К})/I(50\text{ К})$	$I(10\text{ К})/I(50\text{ К})$
10	1,23	1,40	1,75
30	1,20	1,50	1,80
50	1,25	1,40	1,75
100	1,21	1,40	1,70

### ВЫВОДЫ

1. Полученные экспериментальные данные подтвердили удовлетворительное качество системы констант, используемой при расчете характеристик криогенного мезитиленового замедлителя с температурой 20 К для реактора ИБР-2М.

2. Температурная зависимость холодной части нейтронного спектра, формирующегося в мезитиле замедлителя, и практические возможности имеющейся в распоряжении холодильной установки, будучи совместно проанализированными, дадут возможность выбрать оптимальный режим работы криогенного замедлителя.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kulikov S., Shabalin E.* New Complex of Moderators for Condensed Matter Research at the IBR-2M Reactor // Rom. J. of Phys. Publ. House of the Rom. Acad., 2009. V. 54. P. 3–4.
2. *Бузыкин О. Г. и др.* О пневмотранспортировке твердых шариков холодного замедлителя нейтронов. Сообщ. ОИЯИ Р13-2008-116. Дубна, 2008; Прикладная механика и техн. физика (направлено).
3. *Rodríguez Palomino L. A. et al.* Total Cross Section of Solid Mesitylene, Toluene and a Mixture of Them at Thermal Neutron Energies // Nucl. Instr. Meth. B. 2009. V. 267. P. 175–177.
4. *Natkaniec I., Holderna-Natkaniec K., Kalus J.* Neutron Scattering Studies of Methyl Derivatives of Benzene Selected as Potential Materials for Cold Neutron Moderators // Physica B. 2004. V. 350. P. 651–653.
5. User Guide. Neutron Experimental Facilities for Condensed Matter Investigation at JINR / Ed. V. Sikolenko. Dubna, 1997. P. 25.

Получено 20 апреля 2009 г.