

15 Пространственное и энергетическое формирование нейтронных пучков с помощью гибких фторполимерных нейтроноводов

© С.С. Арзуманов, В.И. Морозов, Ю.Н. Панин, А.Н. Стрепетов

Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“,
123182 Москва, Россия
e-mail: Arzumanov_SS@nrcki

(Поступило в Редакцию 30 августа 2016 г.)

Представлены результаты экспериментов по пространственному отклонению и энергетическому формированию реакторных нейтронных пучков с помощью гибких полихлорвиниловых трубок, внутренняя поверхность которых покрыта тонким слоем жидкого фторполимера.

DOI: 10.21883/JTF.2017.03.44260.2023

В работах [1–2] было обнаружено исключительно высокое пропускание ультрахолодных нейтронов (УХН) полихлорвиниловыми трубками промышленного производства. Полихлорвинил (ПВХ) представляет собой высокомолекулярный полимер $(\text{CH}_2-\text{CHCl})_n$ с высоким молекулярным весом молекул в пределах от 30 000 до 100 000 аму. Граничная скорость полихлорвинила $V_{\text{lim}} = 2.9 \text{ m/s}$, поэтому нейтроны, падающие на гладкую поверхность с нормальной компонентой скорости $V_n < V_{\text{lim}}$, зеркально отражаются. Величину V_{lim} можно увеличить, если на поверхность полихлорвинила нанести тонкий ($\sim 10 \mu\text{m}$) слой вещества, обладающего более высокой граничной скоростью, но сохраняющего зеркальность поверхности. В качестве такого покрытия

может быть использован жидкий фторполимер Fomblin YL VAC 18/8, увеличивающий граничную скорость до 4.56 m/s. Коэффициент поглощения нейтронов при отражении от слоя не превышает $(2-3) \cdot 10^{-5}$.

ПХВ трубки с жидким фторполимерным покрытием могут быть использованы для пространственного и энергетического формирования реакторных нейтронных пучков. Для тепловых нейтронов со скоростью 2200 m/s отражение происходит, когда нейтроны падают на поверхность под углом, меньшим критического: $\theta < 0.0021$. При уменьшении скорости нейтронов критический угол отражения возрастает. Нейтроны, проникшие в слой фторполимера, либо рассеиваются, либо захватываются на ядрах. Поэтому по прямой цилиндрической трубке за счет отражений может распространяться поток нейтронов, у которых осевая V_z компонента скорости произвольна, а $V_n < 4.56 \text{ m/s}$. Изгиб трубки без существенной потери интенсивности прошедшего пучка возможен, пока выполняется условие $(2d/R)^{0.5} < \theta$, где R — радиус изгиба трубки, d — внутренний диаметр. Таким образом, изогнутая цилиндрическая трубка-нейтроновод может изменять как направление пространственного распространения пучка тепловых нейтронов, так и его спектральный состав. В настоящей работе описаны возможности отклонения нейтронных пучков и их энергетического формирования с помощью таких трубок.

Схема измерений энергетического распределения нейтронов на выходе трубки методом времени пролета представлена на рис. 1. При исследовании возможности пространственного отклонения нейтронного пучка диск-прерыватель 4 удалялся, а детектором нейтронов 7 служила пластина позиционно-чувствительного Image Plate детектора.

Для измерений использовался касательный горизонтальный канал № 7а реактора ИР-8 НИЦ „Курчатовский институт“. В этом канале источником нейтронов является дополнительный бериллиевый рассеиватель нейтронов, установленный вблизи активной зоны реактора на расстоянии 5.4 m относительно выхода пучка. Нейтроны

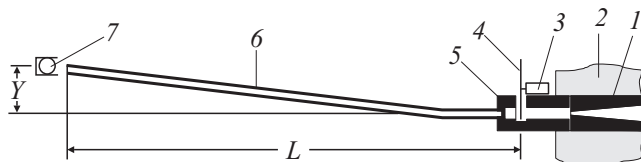


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — стальной конический коллиматор, 2 — биологическая защита, 3 — двигатель диска прерывателя пучка, 4 — диск-прерыватель пучка, 5 — выходной коллиматор из борированного полиэтилена, 6 — ПВХ трубка, 7 — счетчик медленных нейтронов „Гелий-18/180-8.0 БЦ“.

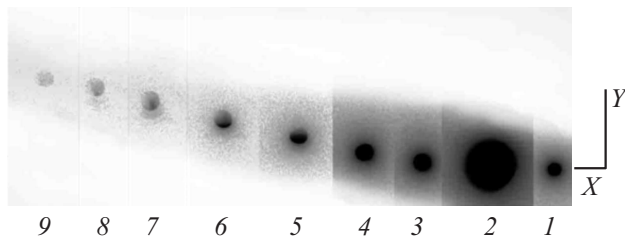


Рис. 2. Изображения нейтронного пучка, полученные с помощью Image Plate детектора: 1 — на выходе коллиматора из борированного полиэтилена, 2 — на расстоянии $L = 118 \text{ cm}$, 3 — на выходе прямой трубки, 4–9 — на выходе изогнутой трубки при $Y = 4, 8, 12, 16, 20, 24 \text{ mm}$ соответственно.

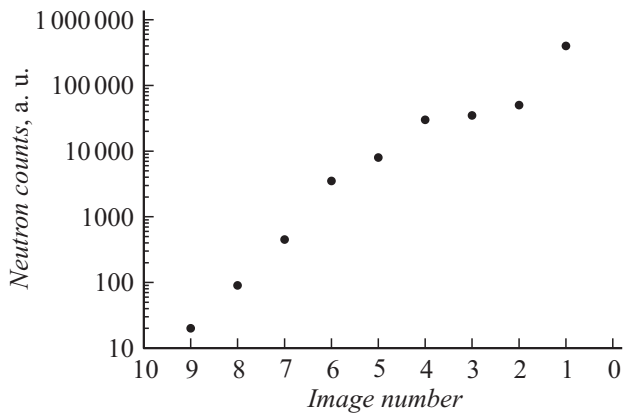


Рис. 3. Значения максимальной плотности потока нейтронов в полученных изображениях.

из рассеивателя проходили через первый конический стальной коллиматор с входным диаметром 80 mm, выходным 40 mm и длиной 2 m (на рис. 1 не показан). Далее нейтроны поступали во второй выходной конический коллиматор из стали с входным диаметром 8 mm, выходным диаметром 3 mm и длиной 70 cm. На выходе этого коллиматора формировался пучок нейтронов с угловой расходимостью около 1°. Далее нейтроны поступали во вспомогательный коллиматор из борированного полиэтилена, в котором крепился начальный участок гибкой ПВХ трубки. Трубка имела внутренний диаметр 8 mm, внешний — 14 mm, длину $L = 118$ cm. Внутренняя поверхность покрыта тонким слоем жидкого фторполимера Fomblin YL VAC 18/8. Трубка устанавливалась горизонтально по оси пучка,

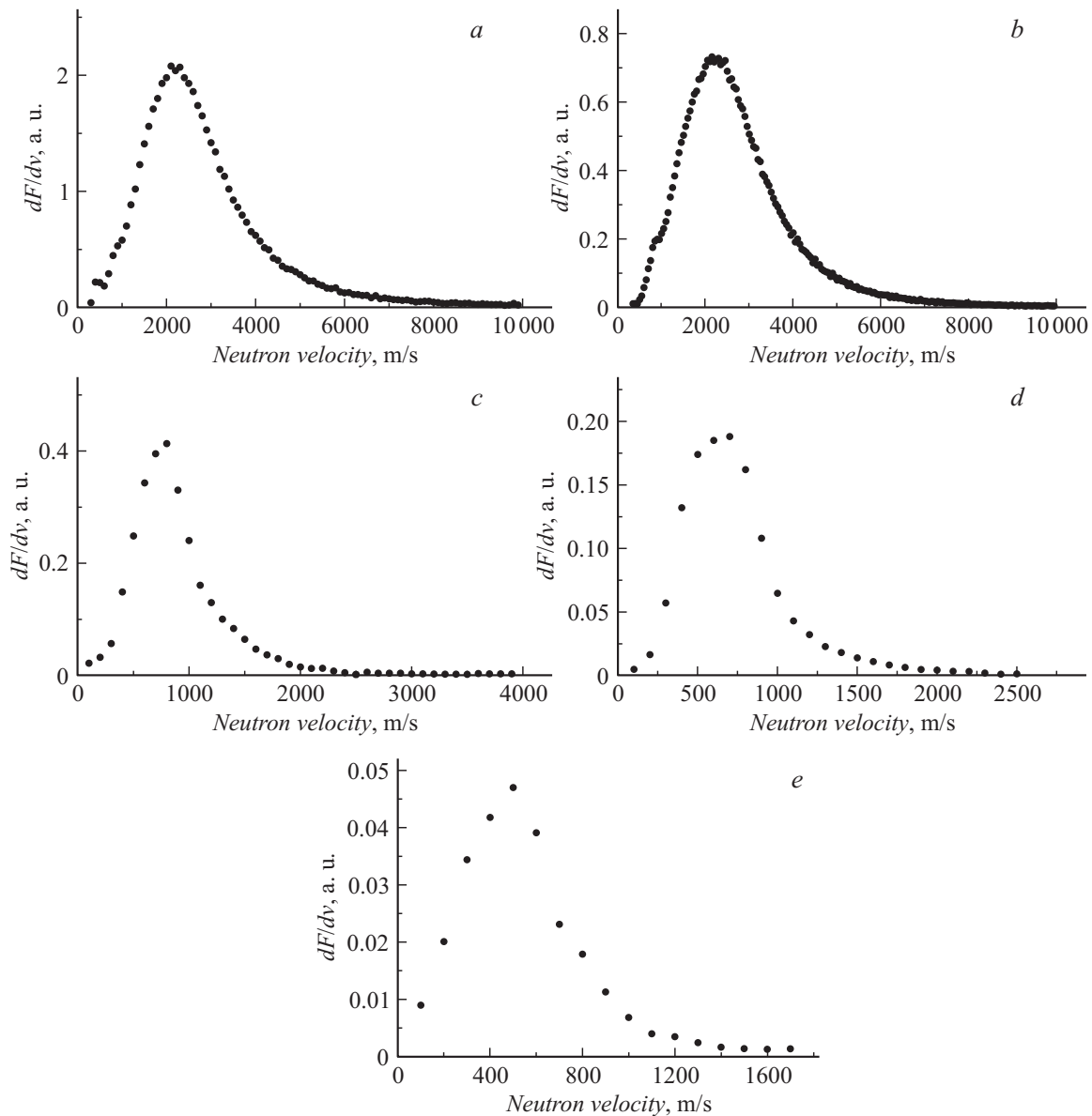


Рис. 4. Спектры потока нейтронов dF/dv в зависимости от скорости нейтронов v при различных высотах Y подъема выходного конца трубки: a — без трубки, b – e — на выходе трубки при $Y = 0, 6, 12, 18$ mm соответственно.

затем плавно изгибалась вверх на начальном участке длиной 50–100 мм. При этом остальная часть трубки оставалась прямой, а выходной ее конец поднимался на высоту Y , изменявшуюся от 0 до 40 мм.

На рис. 2 показаны оптические изображения нейтронного пучка, полученные с помощью Image Plate детектора, чувствительная пластина которого располагалась вблизи выходного отверстия трубки. Распространение нейтронов по прямой трубке происходит как за счет прямого пролета, так и за счет упругих отражений от стенок. Для обеспечения одинаковой эффективности регистрации использовалась одна и та же пластина, перемещавшаяся перпендикулярно оси пучка в горизонтальном направлении примерно на 25 мм при каждой следующей экспозиции.

На выходе коллиматора из борированного полиэтилена нейтронный пучок имеет диаметр около 5 мм (изображение 1), проходя расстояние $L = 118$ см, пучок расширяется до диаметра около 21 мм (изображение 2). При установке на пучок прямой трубки длиной 118 см трубка формирует на выходе пучок диаметром 8 мм, равный ее внутреннему диаметру (изображение 3). При отклонении более чем на величину внутреннего диаметра трубки ($Y > 8$ мм) выходящий поток обусловлен уже только нейтронами, отражающимися от ее внутренней поверхности (изображения 5–9). Это свидетельствует о том, что исследуемые трубки позволяют эффективно отклонять нейтронные пучки с энергией, близкой к тепловой.

О потерях интенсивности отклоняемых пучков можно судить по рис. 3, где представлены значения максимальной плотности потока нейтронов в полученных изображениях. Номер каждого значения соответствует номеру изображения на рис. 2.

Исследование спектральных изменений нейтронного потока на выходе трубок проводилось время-пролетным методом. Поступающий в трубку поток тепловых нейтронов проходил через щель шириной 1 мм во вращающемся кадмиевом диске диаметром 200 мм. Частота оборотов составляла 12.5 Hz. Осевая компонента скорости нейтронов (практически совпадающая с полной скоростью) анализировалась по времени их пролета базового расстояния, практически совпадающего с длиной трубки. На рис. 4 представлены измеренные спектры потока нейтронов dF/dv . При измерениях с прямым потоком без трубки и с прямой трубкой спектр потока описывается распределением, близким к максвелловскому с наиболее вероятной скоростью 2300 м/с. При подъеме выходного конца трубки на высоту $Y = 6$ мм наиболее вероятная скорость проходящего через трубку потока нейтронов уменьшается до 800 м/с и в спектре практически исчезают нейтроны с скоростью более 2200 м/с. При подъеме трубки на высоту $Y = 12$ мм наиболее вероятная скорость проходящего потока уменьшается до 700 м/с, а при подъеме на высоту $Y = 18$ мм наиболее вероятная скорость составляет 500–600 м/с. При этом

в спектре проходящего потока практически отсутствуют нейтроны со скоростью более 1600 м/с.

Таким образом, гибкие ПХВ трубки с жидкостным фторополимерным покрытием позволяют производить пространственное и энергетическое формирование реакторных пучков, что представляет большой интерес для фундаментальных и практических нейтронных исследований. При дальнейшем совершенствовании трубки-нейтронотводы могут быть использованы для извлечения нейтронов холодного и ультрахолодного диапазонов из низкотемпературных конверторов. С практической точки зрения возможно применение трубок как нейтронных катетеров для прямой доставки тепловых нейтронов к злокачественным опухолям при лечении методом нейтрон-захватной терапии [3]. При этом применение гибких нейтронотводов позволяет проводить облучение без поражающего здоровые ткани организма воздействия быстрых нейтронов и γ -излучения ядерного реактора.

Список литературы

- [1] *Arzumanov S., Morozov V., Panin Yu. et al. // ISINN-XYIII. Proceedings of the Seminar. Dubna, 2011. P. 17–22.*
- [2] *Arzumanov S.S., Bondarenko L.N., Geltenbort P.W. et al. // Crystallography Rep. 2011. V. 56. N 7. P. 1197–1199.*
- [3] *Арзуманов С.С., Бондаренко Л.Н., Загрядский В.А. и др. // Атомная энергия. 2010. Т. 109. Вып. 1. С. 19–28.*