

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЖИДКОВОДОРОДНЫЙ ИСТОЧНИК ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ХОЛОДНЫХ И УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ НА РЕАКТОРЕ ВВР-М ЛИЯФ

*И.С.Алтарев, Н.В.Боровикова, А.П.Булкин, В.А.Весна,
Е.А.Гарусов, Л.А.Григорьева, А.И.Егоров,
Б.Г.Ерозолимский, А.Н.Ерыкалов, А.А.Захаров,
С.Н.Иванов, В.Я.Кезерашвили, С.Г.Кирсанов,
Э.А.Коломенский, К.А.Коноплев, И.А.Кузнецов,
В.М.Лобашев, Н.Ф.Маслов, В.А.Митюхляев, И.С.Окунев,
Б.Г.Песков, Ю.В.Петров, Р.Г.Пикулик, А.Н.Пирожков,
Г.Д.Порсев, А.П.Серебров, Ю.В.Соболев, Р.Р.Тальдаев,
В.А.Шустов, А.Ф.Щебетов*

На реакторе средней мощности получены рекордные значения интенсивности и плотности потока поляризованных холодных нейтронов — $3 \cdot 10^{10} \text{ н} \cdot \text{с}^{-1}$ и $6 \cdot 10^8 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, а также интенсивность ультрахолодных нейтронов $5 \cdot 10^5 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1}$ с плотностью потока $6 \cdot 10^3 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ для диапазона скоростей $V_x, V_y, V_z < 7,8 \text{ м/с}$. Степень поляризации нейтронного пучка $90 \pm 5\%$. Проведены исследования выхода ультрахолодных и холодных нейтронов для дейтерия и водородно-дейтериевых смесей.

Универсальный источник поляризованных холодных и ультрахолодных нейтронов был запущен в эксплуатацию на реакторе ВВР-М в конце 1985 года. Жидководородный замедлитель объемом 1 литр расположен в центре активной зоны реактора и окружен свинцовым экраном с целью снижения радиационной тепловой нагрузки (рис. 1). Поток тепловых нейтронов в месте расположения источника $(1,5 \div 2) \cdot 10^{14} \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$. Полное тепловыделение в источнике составляет 2 кВт и складывается из тепловыделения в оболочке источника (800 Вт) и тепловыделения в водороде (1200 Вт). Теплосъем с источника осуществляется циркуляцией жидкого водорода в контуре, содержащем теплообменник, который связан с гелиевым рефрижератором. Общий объем жидкого водорода в контуре 6 литров. Циркуляция жидкого водорода возникает благодаря температурной разности плотностей и асимметричному расположению теплообменника в контуре. Скорость циркуляции жидкого водорода достигает 1 м/с при полной мощности реактора. Для заполнения и сброса водорода используется ресивер объемом 20 м^3 , который связан дренажной линией с жидководородным контуром.

Спектры поляризованных холодных и ультрахолодных нейтронов были измерены временем пролетным методом. Для регистрации холодных нейтронов использовалась ионизационная камера деления, для ультрахолодных — пропорциональный детектор ^3He . Поток поляризованных холодных нейтронов был прокалиброван методом активации золотой фольги. На рис. 2 приведены спектры поляризованных холодных нейтронов, полученные до и после ожигания водорода в источнике. Их отношение определяет фактор выигрыша в выходе холодных нейтронов за счет использования жидководородного замедлителя. Фактор выигрыша имеет характерную спектральную зависимость и достигает 40 — 50 раз в области больших длин волн (10 — 20 Å). Понижение температуры водорода от точки кипения 23,5 до 16,5 К дает 25-процентное увеличение выхода длинноволновых нейтронов. Максимум интенсивности нейтронного потока находится при 4,0 Å. Спектр формируется как низкотемпературным замедлителем, так и изогнутым нейтронным проводом, который обрезает коротковолновую часть спектра. Полный поток поляризованных холодных нейтронов (φ) в месте расположения экспериментальной установки составил $3 \cdot 10^{10} \text{ н} \cdot \text{с}^{-1}$ при плотности потока (f) $6 \cdot 10^8 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, сечение нейтронного пучка $120 \times 40 \text{ мм}^2$. Нейтронный поток часто характеризуют в единицах так называемого захватного потока, т.е. эквивалентного по захвату потоку тепловых

нейтронов. Для полученного пучка холодных нейтронов захватный поток (φ_c) и захватная плотность потока (f_c) соответственно равны $9 \cdot 10^{10}$ н · с⁻¹ и $1,8 \cdot 10^9$ н · с⁻¹ · см⁻². Грубые измерения степени поляризации нейтронного пучка дали результат $90 \pm 5\%$.

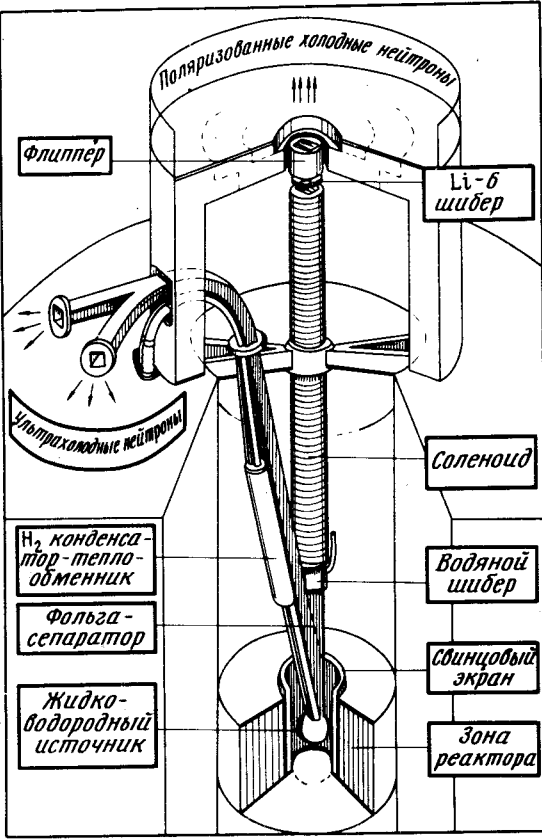


Рис. 1

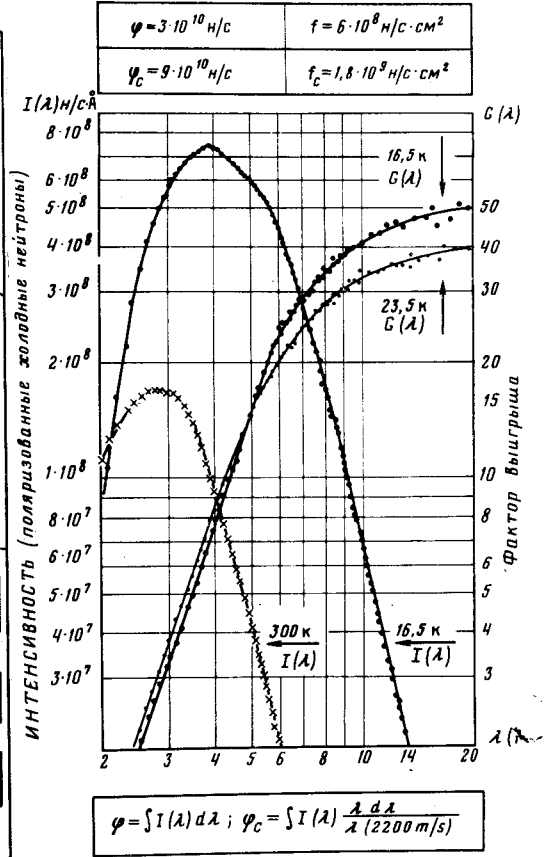


Рис. 2

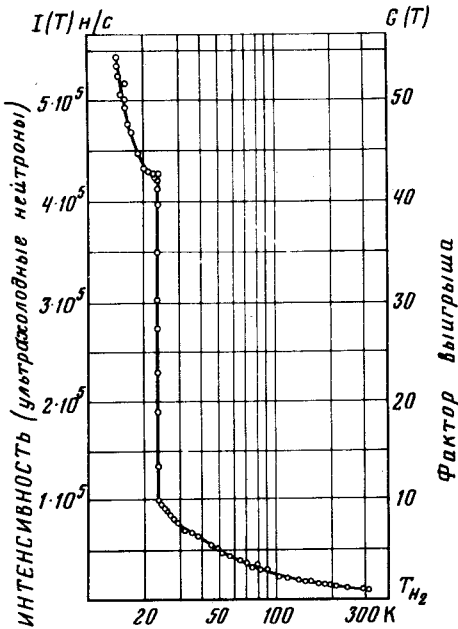


Рис. 3

Рис. 1. Схема универсального жидководородного источника с жидководородным замедлителем

Рис. 2. Спектры нейтронных потоков и факторов выигрыша для поляризованного пучка холодных нейтронов

Рис. 3. Температурная зависимость выхода ультрахолодных нейтронов

Температурная зависимость выхода ультрахолодных нейтронов для газообразного и жидкого водорода приведена на рис. 3. В точке конденсации водорода при $T = 23,5$ К выход ультрахолодных нейтронов резко увеличивается в связи с термализацией потока тепловых нейтронов в замедлителе; дальнейшее понижение температуры жидкого водорода приводит к дополнительному увеличению выхода ультрахолодных нейтронов, при этом фактор выигрыша достигает 55 раз. За единицу принят выход ультрахолодных нейтронов из газообразного водорода при $T = 285$ К, корректный учет доли потока ультрахолодных нейтронов, генерируемого циркониевой оболочкой источника, был осуществлен измерениями с ${}^3\text{He}$ при низком давлении и с откачанным объемом источника.

Спектр нейтронов на выходе нейтронновода ультрахолодных нейтронов имеет максимум при скорости 18,5 м/с, что определяется граничной скоростью покрытия (7,8 м/с) и радиусом нейтронноводных поворотов (1 м). Дифференциальная плотность потока в максимуме $5 \cdot 10^3 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2} (\text{м/с})^{-1}$. Плотность потока ультрахолодных нейтронов со скоростями вдоль оси нейтронновода $V_z < 7,8$ м/с определялась методом шторочной разности, для чего на пути пучка устанавливалась тонкая (10 мкм) алюминиевая фольга с напыленным покрытием, имеющим граничную скорость 7,8 м/с — такую же, как граничная скорость стенок нейтронновода. Спектральные измерения, проведенные со шторкой и без шторки, показывают, что в разностном спектре содержится 20% нейтронов со скоростями $V_z > 7,8$ м/с, поглощенных либо рассеянных на фольге. Определенная с учетом поправки, плотность потока ультрахолодных нейтронов со скоростями $V_x, V_y, V_z < 7,8$ м/с оказалась равной $6 \cdot 10^3 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, а полная интенсивность для двух нейтронноводов — $2 \cdot 2,5 \cdot 10^5 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1}$. Плотность нейтронов в фазовом пространстве $8,1 \cdot 10^{-3} \text{ н} \cdot \text{см}^{-3} (\text{м/с})^{-3}$. Плотность ультрахолодного нейтронного газа, вычисленная из плотности в фазовом пространстве для нашего нейтронновода ($|V| < 7,8$ м/с) равна 16 см^{-3} , а, например, для ловушки из нержавеющей стали ($|V| < 6,2$ м/с) соответственно равна 8 см^{-3} .

Представляло определенный интерес исследовать выходы ультрахолодных и холодных нейтронов для дейтерия и водородно-дейтериевых смесей. Проведенные с тем же источником измерения дали следующие результаты. В точке конденсации дейтерия (25 К) выход ультрахолодных нейтронов (в единицах фактора выигрыша для нормального водорода) составляет 31 — 32 раза, однако с понижением температуры выход очень резко возрастает, достигая при 17 К 66 раз. При температуре 19 К кривые для водорода и дейтерия пересекаются и выходы совпадают. Здесь же пересекаются кривые для водородно-дейтериевых смесей. Для холодных нейтронов фактор выигрыша в случае чистого дейтерия приблизительно втрое меньше. Однако для смеси 40% H_2 и 60% D_2 имеется 10-процентное превышение по сравнению с чистым водородом.

В настоящее время в источнике используется водородно-дейтериевая смесь 40% H_2 , 60% D_2 . В течение времени эксплуатации (более полугода) не замечено падения интенсивности как для ультрахолодных, так и для поляризованных холодных нейтронов. Полученная плотность потока ультрахолодных нейтронов нашего источника уступает приблизительно в 5 раз новому каналу ультрахолодных нейтронов из жидкодейтериевого замедлителя на высокопоточном реакторе в Гренобле¹. Точное сравнение затруднено, поскольку отличаются методы измерений и способы введения поправок. Интенсивность и плотность потока пучка поляризованных холодных нейтронов являются рекордными и превосходят в 3 — 5 раз эти параметры наилучшего пучка поляризованных холодных нейтронов² на гренобльском реакторе. Это достигнуто благодаря максимальному использованию возможностей реактора (размещению источника в центре зоны, что стало возможным за счет высокоэффективной системы жидководородного охлаждения), а также благодаря многоцелевой фокусирующей нейтронноводной системе, которая одновременно поляризует пучок холодных нейтронов.

Авторы выражают благодарность сотрудникам конструкторского отдела, цеха экспериментального оборудования ЛИЯФ и механических мастерских лабораторий нейтронных исследо-

ваний за активное участие в создании универсального нейтронного источника, а также коллективу сотрудников реактора ВВР-М и отдела криогенной и сверхпроводящей техники, оказавшим большое содействие в постановке и эксплуатации созданного источника. Авторы признательны А.В.Стрелкову (ОИЯИ), предоставившему мониторные детекторы, специально разработанные им для ультрахолодного нейтроновода, П.С.Яйджиеву (ИЯИЯЭ БАН), А.В.Васильеву, В.В.Несвижевскому, В.Г.Сыромятникову, Н.К.Плешанову, В.А.Приемьшеву, М.С.Ласакову, Ю.В.Борисову, А.Б.Брандину, оказавшим помощь на разных этапах работы

Литература

1. *Ageron P., Mampe W.* In: The Investigation of Fundamental Interactions with Cold Neutrons. Proceedings of a Workshop. NBS Special Publication: 711. Gaithersburg, 1986, p. 16.
2. Neutron Research Facilities at the ILL High Flux Reactor. – Institut Max von Laue – Paul Langevin, Grenoble, France, 1983.

Институт ядерной физики им. Б.П.Константинова
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
21 августа 1986 г.