

ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЕРДОДЕЙТЕРИЕВОГО ИСТОЧНИКА УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ

*А.П.Серебров, В.А.Митюхляев, А.А.Захаров, А.Г.Харитонов,
В.В.Несвижевский, М.С.Ласаков, Р.Р.Тальдаев, А.В.Алдуценков,
В.Е.Варламов, А.В.Васильев, Г.Грин*¹⁾, Т.Боулс⁺¹⁾*

*Санкт-Петербургский институт ядерной физики РАН
188350 Гатчина, Россия*

** National Institute of Standards and Technology
Washington, USA*

*+ Los Alamos National Laboratory
87545 Los Alamos, New Mexico, USA*

Поступила в редакцию 2 октября 1995 г.

Представлены результаты исследований выхода ультрахолодных нейтронов (УХН) из твердого дейтерия, выполненные на модели источника на реакторе ВВР-М Санкт-Петербургского института ядерной физики. Фактор температурного выигрыша в выходе УХН при 13–14К из твердого дейтерия по отношению к выходу УХН при комнатной температуре из газового состояния составил 1230 раз и 550 раз при температуре твердого дейтерия 18.7К (тройная точка).

В работе [1] была проанализирована возможность увеличения плотности ультрахолодных нейтронов (УХН) за счет использования в качестве источника УХН твердого дейтерия при низких температурах. В данной работе представлены результаты экспериментального исследования выхода УХН из твердого дейтерия, выполненные на модели источника УХН на реакторе ВВР-М ПИЯФ.

Схема расположения источника показана на рис.1. Камера источника из циркония (цилиндр $D = 150$ мм, $l = 350$ мм с эллиптическими донышками) объемом 6л имеет двойную стенку (2×0.5 мм), где в зазоре протекает гелий от криогенного рефрижератора мощностью 150Вт на температурном уровне 4.5К. При охлаждении камеры дейтерий из ресивера с объемом 6м³ поступает в камеру, конденсируется и переходит по мере охлаждения в твердое состояние.

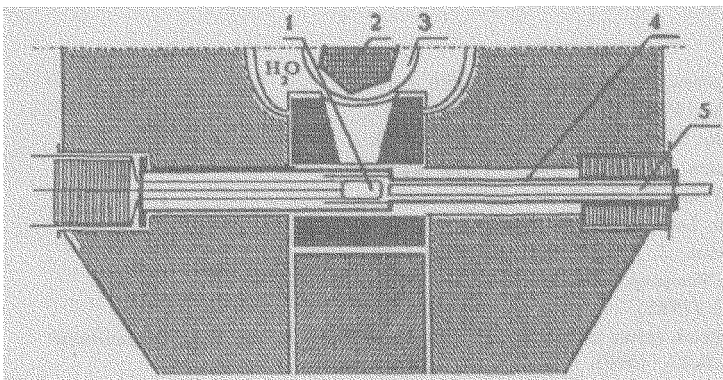


Рис.1. Расположение твердодейтериевого источника на реакторе: 1 - камера с твердым дейтерием, 2 - активная зона реактора, 3 - бериллиевый отражатель, 4 - вакуумный контейнер, 5 - нейтронный канал для УХН

¹⁾G.Greene, T.Bowles

Получение температуры дейтерия ниже 10–12 К требует специального технического решения конструкции камеры источника. Проблема состоит в том, что при понижении температуры тепловой контакт между охлаждаемой стенкой камеры и дейтерием нарушается. Охлаждение возможно, пока давление насыщенных паров не упадет ниже нескольких мм рт.ст. Например, при температуре 12 К давление насыщенных паров всего лишь 0,75 мм рт.ст., а при 10 К – $5 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст. Возможным техническим решением является размещение дополнительной охлаждаемой трубки в виде спирали по внутренней поверхности камеры, при охлаждении трубка будет обжиматься дейтерием, что должно решить проблему теплового контакта. Однако, прежде чем усложнять конструкцию камеры, мы решили на первом этапе провести исследования с простейшей конструкцией, на втором этапе с той же конструкцией, но с дейтерием, содержащим малое количество гелия для обеспечения теплообмена и только потом усложнять конструкцию источника, если это будет необходимо. В данной публикации представлен первый этап исследований в температурном интервале выше 13 К.

Одной из наиболее сложных задач данного исследования является определение температурного поля твердодейтериевого источника. Однако с невысокой точностью температура источника могла быть определена достаточно легко – по остаточному давлению дейтерия в ресивере, так как источник, соединенный трубопроводом с ресивером, представляет собой конденсационный термометр, в котором давление насыщенных паров определяется температурой источника. К сожалению, из-за большого объема ресивера время релаксационного процесса по установлению равновесного давления является значительным, что приводит к ярко выраженному явлению гистерезиса в экспериментальной зависимости выхода УХН от давления в ресивере. Рис.2а демонстрирует зависимость фактора выигрыша УХН от давления в ресивере в процессе захолаживания и расхолаживания источника.

Другая, но не столь тривиальная, неоднозначность в выходе УХН, которая была обнаружена в эксперименте, по-видимому, связана с изменением орто-пара состава дейтерия под влиянием низких температур и реакторного излучения. Кривая 1 на рис.2б была получена в первом эксперименте по захолаживанию источника, который был произведен в достаточно быстром темпе и на малой мощности реактора (2 МВт). Температурный фактор выигрыша в этом эксперименте составил всего лишь 450 раз. Последующее захолаживание источника (кривая 2 на рис.2б) было произведено в медленном темпе и на мощности реактора 14 МВт, температурный фактор выигрыша составил 790 раз. После расхолаживания источника дейтерий в ресивере оказался практически полностью в орто-фазе ($95 \pm 5\%$) и сохранялся в дальнейшем без видимых изменений состава. При последующих захолаживаниях источника температурный фактор выигрыша достиг 1230 раз и более не увеличивался. Кривая 3 на рис.2б соответствует четвертому захолаживанию. Зависимость выхода УХН от орто-пара состава дейтерия является наиболее вероятным объяснением данного явления, однако для его подтверждения требуются повторные измерения.

Одной из очевидных проблем получения высокого выхода УХН из твердодейтериевого источника является требование его прозрачности к УХН. Растрескивание твердого дейтерия из-за значительных температурных напряжений может привести к рассеянию УХН на неоднородностях (трещинах). Когда эффективная длина пробега между неоднородностями меньше длины пробега,

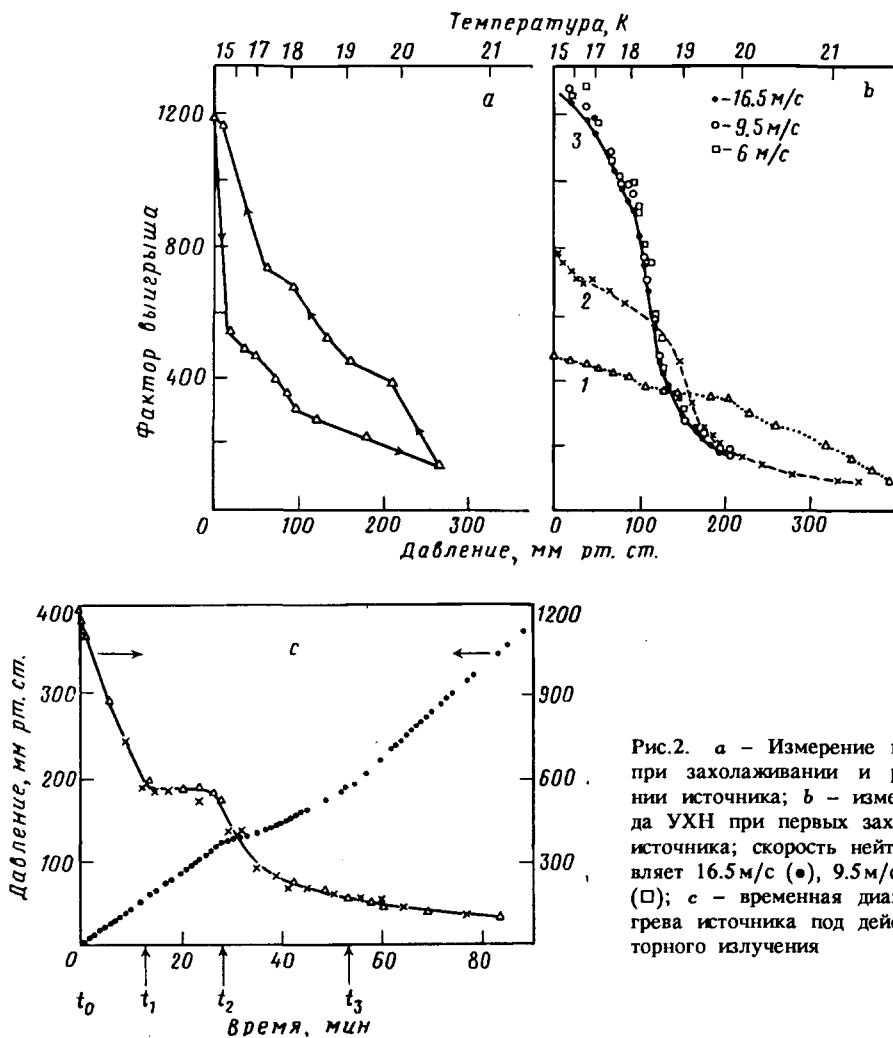


Рис.2. а - Измерение выхода УХН при захлаживании и расхлаживании источника; б - измерение выхода УХН при первых захлаживаниях источника; скорость нейтронов составляет 16,5 м/с (●), 9,5 м/с (○) и 6 м/с (□); с - временная диаграмма отогрева источника под действием реакторного излучения

определяемой сечением неупругого рассеяния и захвата УХН, фактор выигрыша перестает увеличиваться с понижением температуры. Для исследования этого вопроса проводились измерения температурного фактора выигрыша одновременно для УХН со средней скоростью 6 м/с и для очень холодных нейтронов в двух диапазонах скоростей, так что средние скорости составляли 9,5 м/с и 16,5 м/с. Поскольку коэффициент преломления резко зависит от скорости нейтрона, то эффективная мутность твердого дейтерия из-за растрескивания должна проявляться в первую очередь для УХН (коэффициенты преломления для 6 м/с, 9,5 м/с и 16,5 м/с соответственно равны 0,68, 0,886 и 0,964). Кривая 3 на рис.2б представлена результатами измерений для всех вышеуказанных скоростей нейтронов. Заметного отличия в ходе температурной зависимости выхода нейтронов для различных скоростей не наблюдается. Это свидетельствует о том, что мутность среды пока себя не проявила. Длина пробега при температуре дейтерия 13 К согласно расчетам составляет: 4 см,

8 см и 16 см для скоростей соответственно 6 м/с, 9.5 м/с и 16.5 м/с. Из-за отсутствия зависимости в факторе выигрыша можно прийти к выводу, что глубина прозрачности твердого дейтерия во всяком случае не ниже указанных величин. Для более детального изучения этого вопроса требуется понижение температуры источника до 5–6 К.

Кроме измерения выхода УХН при захолаживании и расхолаживании источника с помощью рефрижератора (рис.2а), были проведены измерения зависимости выхода УХН при отогреве источника под действием только радиационной нагрузки, а рефрижератор отключался. В этих экспериментах удалось определить более точно фактор выигрыша при температуре тройной точки для твердого и жидкого дейтерия и мощность радиационной нагрузки. На рис.3 показаны: выход УХН и давление в ресивере в процессе отогрева при постоянной тепловой нагрузке (радиационное тепловыделение). В течение первых 28–30 мин ($t_0 - t_2$) рост давления в ресивере происходит линейно и определяется в основном теплотой сублимации, а поглощение тепла на нагрев твердого дейтерия является незначительным. Линейный рост продолжается до установления равновесного давления сублимации в тройной точке 128 мм рт.ст. В течение последующих 25–30 мин ($t_2 - t_3$) происходит плавление твердого дейтерия наряду с процессами испарения и нагрева жидкости. В это время скорость поступления газа в ресивер снижается, так как часть мощности расходуется на плавление. Процесс плавления заканчивается к моменту времени t_3 , после чего скорость поступления газа в ресивер снова становится постоянной и определяется теплотой испарения дейтерия. По скорости поступления газа была определена мощность теплоподвода, которая составила 36 Вт при включенном реакторе и 6 Вт – при выключенном.

В зависимости выхода УХН от времени (кривая 2 на рис.2с) имеется некоторое плато между моментами t_1 и t_2 . Оно соответствует температуре тройной точки. В начальный момент времени t_0 при температуре 13–14 К температурный фактор выигрыша составлял 1230 раз. К моменту времени t_1 дейтерий нагревается до 18.7 К и сохраняет эту температуру благодаря сублимации до момента времени t_2 , когда давление в ресивере достигает равновесного давления сублимации. Температурный фактор выигрыша для твердого дейтерия вблизи тройной точки составил 500–550 раз. К моменту времени t_3 , когда дейтерий полностью жидкий, а его температура равна 19.5–20 К, фактор выигрыша составляет 120 раз. Дальнейшее понижение фактора выигрыша связано с нагревом жидкости.

Заметное увеличение фактора выхода в процессе кристаллизации (в 4–4.5 раза) определяется эффектом улучшения термализации нейтронного потока в твердом дейтерии по сравнению с жидким дейтерием из-за увеличения полного сечения взаимодействия, благодаря брегговскому рассеянию. Этот эффект наблюдался непосредственно в измерениях полного спектра нейтронов из источника. На рис.3а показаны времяпролетный спектр до конденсации дейтерия (кривая 1), после конденсации (дейтерий в жидкой фазе, кривая 2) и после кристаллизации (дейтерий в твердой фазе, кривая 3). Падающий на источник спектр нейтронов имеет эффективную температуру 600 К. Благодаря термализации в дейтерии спектр значительно смягчается, причем разница в эффекте термализации для жидкой и твердой фаз наблюдается в области 4–6 Å. Для твердой фазы в нейтронном спектре наблюдались характерные нерегулярности, связанные с брегговскими рефлексами. Интересно отметить, что структура ре-

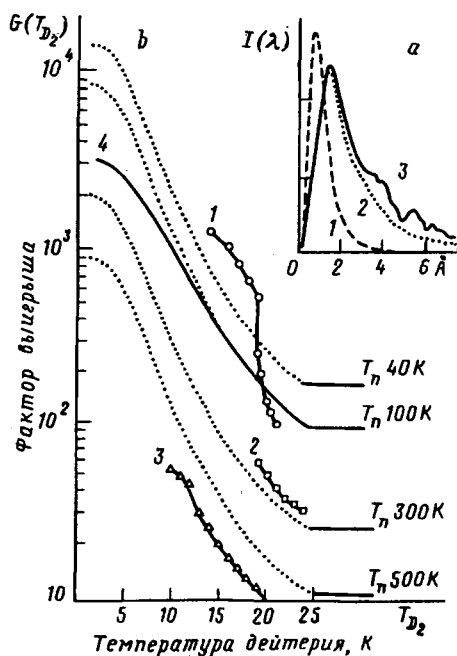


Рис.3. *a* – Времяпролетные спектры источника для разных фазовых состояний дейтерия; *b* – анализ фактора выигрыша для дейтериевых источников разных объемов

флексов оказалась разной для первого и второго захлаживания, что может быть связано с зависимостью от орто-пара состава и скорости захлаживания. Спектр нейтронов из твердодейтериевого источника может быть представлен как сумма двух спектров: 56% интенсивности с эффективной температурой 180 К и 44% интенсивности с эффективной температурой 30 К. Расчет выхода УХН с указанной формой спектра оказался очень близким к расчету с эффективной температурой 100 К. Именно нейтроны с длиной волны больше 3 Å способны переходить в УХН однофононным процессом, поэтому увеличение доли длинноволновых нейтронов приводит к увеличению выхода УХН при кристаллизации дейтерия. Как видно, твердодейтериевый источник оказывается более эффективным также для производства холодных и очень холодных нейтронов.

Окончательный анализ результатов исследований представлен на рис.3*b*, где показана температурная зависимость выигрыша для твердодейтериевого источника объемом бл, полученная в данных исследованиях (кривая 1), а также результаты ранее проведенных исследований [2] для жидкодейтериевого источника объемом 1 л (кривая 2) и для твердодейтериевого источника объемом 0,15 л [3] (кривая 3). Увеличение выхода УХН достигается как при понижении температуры источника, так и при понижении эффективной температуры нейтронного потока за счет увеличения объема источника. Результаты расчетов из работы [1] представлены для абсолютно чистого дейтерия и для эффективных температур нейтронного потока 40, 100, 300 и 500 К. Сплошная кривая 4 – расчет для эффективной температуры 100 К и сечения захвата в дейтерии с учетом примеси водорода (0,2 об.%) и азота ($4,6 \cdot 10^{-3}$ об.%).

Следующий этап исследований предполагает понижение температуры источника до 6–7 К с целью изучения возможности увеличения выхода УХН.

Следует отметить, что при температуре 6–7 К теплопроводность твердого ортодейтерия увеличивается на порядки величины, что должно улучшить свойства источника по отношению к тепловой нагрузке.

Результаты исследований могут быть использованы для разработки проектов твердодейтериевого источника холодных и ультрахолодных нейтронов на высокопоточных реакторах с тяжеловодным отражателем, поскольку тяжелая вода является эффективной защитой от быстрых нейтронов и γ -квантов и обеспечивает низкий уровень тепловыделений при сохранении высокого потока тепловых нейтронов (строящийся реактор ПИК, Гатчина, реактор ILL, Гренобль). Другая возможность – применение твердодейтериевого источника на нейтронных spallation источниках, где отношение тепловыделения и нейтронного потока заметно лучше, чем для реакторов. Например, планируется разработка проекта твердодейтериевого источника УХН на spallation источнике мощностью 1 МВт в Los Alamos (США).

Авторы выражают благодарность за активное участие в проведении измерений и их подготовке сотруднику ОИЯИ А.В.Стрелкову, сотрудникам ПИЯФ Н.Г.Кольвановой, В.В.Рунову, М.О.Хониной, а также сотрудникам отдела физики и техники реакторов и главному инженеру реактора Р.Г.Пикулику, сотрудникам криогенного отдела института и цеха экспериментального оборудования.

Работа выполнена при поддержке Национального института стандартов и технологии, США, Лос-Аламоской Национальной лаборатории, США, Российского фонда фундаментальных исследований (грант 93-02-14382), Международного научного фонда ISF (грант R59300), Европейского научного фонда INTAS (проект 93-298).

-
1. A.P.Serebrov, V.A.Mityukhlyayev, A.A.Zakharov et al., Письма в ЖЭТФ 59, 728 (1994).
 2. И.С.Алтарев, Н.В.Боровикова, А.П.Булкин и др., Письма в ЖЭТФ 44, 269 (1986).
 3. I.S.Altarev, Y.V.Borisov, A.B.Brandin et al., Phys. Lett. 80A, 413 (1980).