

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 621.039

РАЗРАБОТКА ИСТОЧНИКА ХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ ВЫСОКОЙ ЯРКОСТИ ДЛЯ КАНАЛА ГЭК-2 РЕАКТОРА ПИК

© 2022 г. В. А. Митюхляев^a, М. С. Онегин^a, *

^aПетербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра
“Курчатовский институт”, Гатчина, Ленинградская область, 188300 Россия

*E-mail: onegin-ms@pnpi.nrcki.ru

Поступила в редакцию 20.12.2021 г.

После доработки 21.12.2021 г.

Принята к публикации 27.12.2021 г.

Рассматривается жидкодейтериевый источник холодных нейтронов для канала ГЭК-2 реактора ПИК. Проведено сравнение двух вариантов расположения камеры источника в отражателе реактора по отношению к центру активной зоны. Показано, что при приближении камеры к центру активной зоны резко растет энерговыделение в ней. При этом яркость источника растет слабее. Продемонстрирована существенная роль вытеснителя при использовании дейтериевой камеры большого объема. Рассчитана яркость источника для двух вариантов расположения его в отражателе, а также энерговыделение в камере источника и подводящих трубах. Источник с энерговыделением 10 кВт во внутриканальной вставке может иметь рекордную яркость по сравнению с другими ИХН на реакторах в мире.

Ключевые слова: источник холодных нейтронов, яркость нейтронного источника, реактор ПИК, жидкий дейтерий

DOI: 10.56304/S2079562922030307

ВВЕДЕНИЕ

Вводимый в эксплуатацию реактор ПИК предполагается использовать для проведения широкого круга исследований по физике твердого тела при помощи нейтронов [1]. Для этого на выведенных нейтронных пучках реактора создается набор нейтронных станций, использующих нейтроны в разных энергетических диапазонах: от холодных, с длиной волны в диапазоне от 4 Å до 20 Å, вплоть до эпитепловых с длиной волны порядка 0.4 Å. Для получения интенсивных пучков холодных нейтронов необходимо использовать специальные источники холодных нейтронов, содержащие холодный замедлитель. В высокопоточном реакторе, каковым является реактор ПИК, большое значение приобретают вопросы радиационной стойкости рабочего тела замедлителя, так что выбор приходится делать между жидким водородом и жидким дейтерием. Каждый из этих замедлителей обладает набором достоинств и недостатков, но главным критерием выбора, на настоящее время, является получение источника холодных нейтронов наибольшей яркости.

Источники холодных нейтронов, использующие водород и дейтерий, отличаются своими размерами и формой, что, в первую очередь, вызвано

различиями в нейтрон-ядерных характеристиках взаимодействий с молекулами водорода и дейтерия. Сравнение свойств водорода и дейтерия приведено в табл. 1. Как следует из таблицы, сечение некогерентного рассеяния на ядре водорода существенно превосходит сечение когерентного рассеяния, в то время как для ядра дейтерия различия менее значительны. Также ядро дейтерия обладает существенно меньшим сечением радиационного захвата нейтрона, так что деградацией плотности потока нейтронов в дейтериевой камере за счет нейтронных захватов можно пренебречь. В связи с меньшей температурой кипения для жидкого водорода, чем для жидкого дейтерия, водородная камера должна работать при более низких температурах. Это, с одной стороны, увеличивает затраты на охлаждение такой камеры при одинаковом с дейтериевой энерговыделении, с другой обеспечивает меньшую температуру нейтронов, находящихся в тепловом равновесии внутри камеры.

Благодаря существенно различающимся характеристикам длин когерентного и некогерентного рассеяний в водороде, жидкий параводород имеет существенно отличающееся сечение неупругого рассеяния нейтронов по сравнению с ортоводородом. Так жидкий параводород стано-

Таблица 1.

	LN ₂	LD ₂
Температура плавления, К*	13.9	18.62
Температура кипения, К*	20.4	23.67
Энергия возбуждения ротационного уровня, мэВ	14.7	7.4
Сечение рассеяния		
некогерентное, бн	20.052	0.907
когерентное, бн	0.397	2.489
Сечение захвата нейтрона с энергией 27.3 мэВ, бн	0.332	0.000508

* При нормальных условиях.

вится практически прозрачным по отношению к холодным нейтронам с энергией порядка 5 мэВ, в то время как длина свободного пробега для нейтронов с такой энергией в жидком орто-водороде не превосходит 5 мм. При энергиях же порядка 70 мэВ сечения неупругого рассеяния для двух модификаций водорода совпадают. Используя такое различие в сечениях, в работе [2] было предложено использовать в качестве рабочего тела в ИХН жидкий параводород, так что камера с параводородом вытянута вдоль оси канала реактора, имея малое поперечное сечение. Тепловые нейтроны, падая с боков камеры, эффективно термализуются холодным параводородом, попадая в энергетический интервал с большой длиной свободного пробега, что позволяет им эффективно вылетать по направлению к выходу из канала. Альтернативой такому источнику служит ИХН на основе жидкого дейтерия. Для дейтерия различия в нейтронно-физических свойствах орто- и парасостояний менее существенны, так что весовой состав состояний не имеет большой роли при работе источника на основе жидкого дейтерия. Хотя жидкий дейтерий обладает меньшей способностью к термализации, температуру нейтронов в камере с жидким дейтерием можно уменьшить, увеличивая объем жидкого дейтерия. Однако наиболее холодные нейтроны образуются при этом в центре камеры, так что длина их свободного пробега оказывается существенно меньше, чем радиус камеры. Для эффективного вывода нейтронов из камеры используют специальные вытеснители — полости в камере со стороны выхода из канала, так что нейтроны могут вылетать из центра камеры вдоль такой полости.

Использование параводородного источника холодных нейтронов в реакторах требует еще дополнительных исследований, поскольку для его построения требуется как создание ряда систем по сравнению с дейтериевым источником (катализатор конверсии в параводород, аппаратура контроля состояния водорода в источнике и др.),

так и возникают существенные вопросы сопряжения источника малого поперечного размера с нейтронотводной системой. Вместе с тем, ИХН на основе жидкого дейтерия имеются на высокопоточном реакторе HFR в Гренобле [3]. Реактор в Гренобле обладает близкими с реактором ПИК характеристиками как по плотности потока нейтронов в тяжеловодном отражателе, так и по характеристикам удельного энерговыделения в конструкционных материалах. Источники холодных нейтронов на основе жидкого дейтерия были созданы на реакторе OPAL в Австралии [4], а также на реакторе CARR-II в Китае [5]. За время работы источники доказали свою надежность и эффективность.

В данной работе мы ограничимся рассмотрением источника холодных нейтронов на основе жидкого дейтерия для канала ГЭК-2 реактора ПИК. В качестве главных характеристик источника, определяющих его производительность, рассматриваются форма камеры источника с жидким дейтерием, а также его положение в отражателе по отношению к центру активной зоны реактора. Производительность источника определяется его яркостью и площадью поверхности камеры, с которой испускаются холодные нейтроны в нейтронотвод. При этом, в настоящее время, приоритет отдается величине яркости источника. Положение источника в отражателе по отношению к центру активной зоны реактора определяет тепловыделение в нем. Мы рассматриваем ИХН с принудительным охлаждением холодным гелием. Это увеличивает массу камеры источника, однако позволяет развязать работу реактора и источника. Источник при этом может работать в теплом режиме без заполнения камеры источника жидким дейтерием.

Целью настоящей работы является разработка ИХН в канале ГЭК-2 реактора ПИК на основе жидкого дейтерия с максимально возможной яркостью, но тепловой мощностью, не превышающей 10 кВт.

1. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЯРКОСТИ ИСТОЧНИКА ХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ

Расчет яркости холодных нейтронов проводился методом Монте-Карло по программе MCNP [6]. Для расчета рассеяния тепловых нейтронов в модераторе ИХН используются специально подготовленные библиотеки рассеяния нейтронов на ядрах жидкого дейтерия. Они описывают неупругое рассеяние нейтронов с энергией менее 4 эВ. Согласно общей теории неупругого рассеяния [7] дважды-дифференциальное сечение рассеяния можно представить в виде

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega d\varepsilon}(E \rightarrow E', \mu) = \frac{\sigma_b}{2kT} \sqrt{\frac{E'}{E}} S(\alpha, \beta),$$

где

$$\alpha = \frac{E' + E - 2\sqrt{EE'}\mu}{AkT}, \quad A = \frac{M}{m_n}$$

пропорционально квадрату переданного нейтроном импульса, а

$$\beta = \frac{E' - E}{kT}.$$

Здесь T — температура рассеивающей среды, E' и E — энергия нейтрона после и до рассеяния соответственно, M — масса молекулы, на которой рассеивается нейтрон, μ — косинус угла рассеяния, сечение σ_b вычисляется по формуле

$$\sigma_b = 4\pi(a_c^2 + a_i^2),$$

где a_c — длина когерентного рассеяния, a_i — длина некогерентного рассеяния на рассеивающем ядре. Для расчета функции рассеяния $S(\alpha, \beta)$ используется борновское приближение с псевдопотенциалом Ферми в качестве рассеивающего потенциала. Псевдопотенциал Ферми описывает рассеяние медленных нейтронов на молекуле дейтерия и использует длины когерентного и некогерентного рассеяний в качестве параметров. Длины когерентного и некогерентного рассеяний выражаются через длины рассеяния в каналах со спином $\frac{3}{2} - a_+$ и $\frac{1}{2} - a_-$ в рассеянии нейтрона на ядре дейтерия по формулам

$$a_c = \frac{I+1}{2I+1}a_+ + \frac{I}{2I+1}a_-,$$

$$a_i = |a_+ - a_-| \frac{\sqrt{I(I+1)}}{2I+1},$$

где $I = 1$ — для ядра дейтерия.

Экспериментально измеренные длины рассеяния равняются: $a_+ = 6.34 \pm 0.02$ фм и $a_- = 0.65 \pm 0.03$ фм [8].

Общая формула для функции $S(\alpha, \beta)$ рассеяния нейтронов на молекулах водорода и дейтерия была получена в работе Янга и Коппеля в 1964 г., [9]. Их теория адекватно описывает рассеяние нейтронов на молекулах H_2 и D_2 в газовой фазе. Для жидкой фазы нужно учитывать два дополнительных эффекта: интерференцию рассеянных нейтронных волн при рассеянии на различных молекулах, а также вязкость среды, влияющую на отдачу молекулы при рассеянии.

Тепловые нейтронные библиотеки для рассеяния на жидком дейтерии были рассчитаны Мак-Фарлапом в работе [10] в рамках общих библиотек

оцененных нейтронных данных ENDF/B-VI.2 в 1994 г. В этой работе учет отдачи ядра проводится с использованием модели Кейнерта и Сакса [11], а учет интерференции рассеяния нейтрона — на различных ядрах среды выполняется с использованием приближения Вайниардом [12], модифицирующего дважды-дифференциальное сечение рассеяния нейтрона с использованием статического структурного фактора $S(\kappa)$

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega d\varepsilon} = \frac{d^2\sigma_{coh}}{d\Omega d\varepsilon} S(\kappa) + \frac{d^2\sigma_{incoh}}{d\Omega d\varepsilon}.$$

Здесь κ — переданный ядру волновой вектор. Эффективно в формулах Янга и Коппеля это сводится к замене квадрата длины когерентного рассеяния a_c^2 на величину $S(\kappa)a_c^2$.

Дальнейшие реализации библиотеки ENDF/B включали тепловые библиотеки, подготовленные для жидкого дейтерия при температуре 19К с использованием того же формализма.

Расчеты нейтронных полей в реакторе ПИК выполнялись для полномасштабной модели реактора, включающей детальное описание активной зоны реактора, отражателя с экспериментальными каналами и внутриканальной вставки ИХН. Камера ИХН представляла из себя сферу с оболочкой из алюминиевого сплава АМг5. Толщина оболочки составляла 4 мм, что примерно соответствует двойной толщине стенки реальной камеры ИХН. Канал ГЭК-2, куда вставлялась камера, представлял из себя трубу из сплава АМг3 с полусферическим доньшком. Расчет яркости источника выполнялся по методу локальной оценки потока. Для этого спектральная плотность потока, вычисленная в точке на некотором расстоянии L (~150 см) от центра камеры ИХН, делилась на величину телесного угла конуса $d\Omega$, который вырезал материалы, рассеяние на которых только и давали вклад в рассчитываемую плотность потока нейтронов:

$$Br(\lambda) = \frac{d\Phi(\lambda, d\Omega)}{d\Omega}.$$

2. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ ФОРМЫ И ПОЛОЖЕНИЯ ДЕЙТЕРИЕВОЙ КАМЕРЫ В ОТРАЖАТЕЛЕ РЕАКТОРА

В настоящее время канал ГЭК-2 реактора ПИК может использоваться только для вывода тепловых нейтронов. Для использования его для размещения внутриканальной вставки источника холодных нейтронов нужно спроектировать новый канал. Основные параметры канала, влияющие на яркость и энерговыделение ИХН, помещенного в него, являются положение доньшка канала, его диаметр, а также толщина и материал стенки канала. Согласно проведенным ранее ис-

Таблица 2. Параметры канала ГЭК-2 с помещенной в него камерой ИХН

Вариант	Расстояние от центра доньшка канала до центра АЗ, см	Диаметр канала, см	Объем камеры*, л
1	51.4	330	10.54 (8.3)
2	69.4	380	20.94 (14.3)

* В скобках указан объем жидкого дейтерия с учетом вытеснителя.

следованиям [13], яркость дейтериевой камеры, помещенной в тяжеловодный отражатель, растет при увеличении ее объема при одинаковой форме. Мы предполагаем использование алюминиевого или циркониевого каналов с полусферическим доньшком. Форма камеры предполагается сферической с центром, совпадающим с центром доньшка канала. Важным вопросом является эффективный вывод холодных нейтронов из камеры с жидким дейтерием. Как показывают расчеты, максимальная плотность холодных нейтронов имеет место в центре камеры. Предварительные исследования показывают [13], что максимальный внутренний объем камеры с жидким дейтерием должен превышать 10 литров для эффективной термализации нейтронов в ней. Это соответствует радиусу камеры более 13 см. Вместе с тем, длина свободного пробега нейтрона с длиной волны 4 Å в жидком дейтерии составляет величину порядка 3 см, так что плотность потока холодных нейтронов падает на поверхности камеры почти в 10 раз по сравнению с центром камеры. Для эффективного вывода нейтронов из центра в дейтериевых источниках предусматривают специальный вытеснитель.

Мы сравниваем два варианта канала ГЭК-2 с помещенными в них камерами разных объемов.

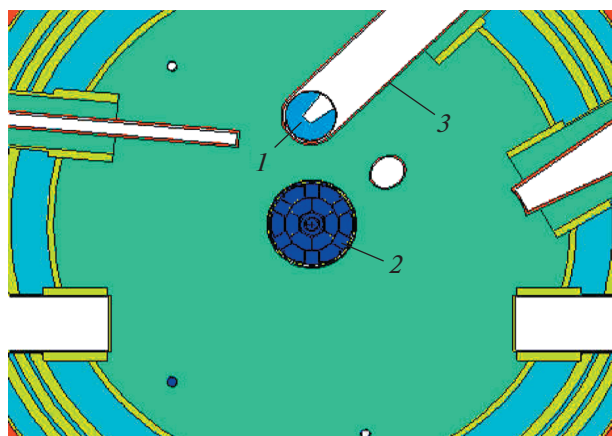


Рис. 1. Горизонтальный разрез реактора ПИК: 1 – камера ИХН с вытеснителем, заполненная дейтерием (вариант 1); 2 – активная зона; 3 – экспериментальный канал ГЭК-2.

Они различаются положением центра полусферического доньшка относительно центра активной зоны реактора: расстояние между центрами в первом случае составляет 51.4 см и 69.4 см во втором. Другие параметры источника и канала приведены в табл. 2.

На рис. 1 приведен горизонтальный разрез компьютерной модели отражателя реактора ПИК с каналом ГЭК-2 и помещенной в него камерой ИХН для варианта 1 источника. Камера, представленная на рис. 1, имеет вытеснитель, имеющий форму трапеции в разрезе. Вершина трапеции имеет длину 6 см, а тангенс угла боковых сторон трапеции с осью канала равен 0.15. Вершина трапеции сдвинута относительно центра сферической оболочки камеры по оси канала к активной зоне на 3 см. Высота вытеснителя составляет 20 см. Такая форма вытеснителя была выбрана в результате проведения серии оптимизационных расчетов с целью увеличения нейтронной яркости, а также определяется высотой нейтронного вытеснителя нейтронной системы – 20 см.

Расчетная яркость на камеры для варианта 1 – с вытеснителем и без – приведена на рис. 2. Как следует из сравнения, вытеснитель увеличивает яркость камеры только для длин волн нейтрона менее 8.5 Å. Яркости камер с вытеснителем и без для нейтронов с большими длинами волн практически совпадают. Это вызвано тем обстоятельством, что для нейтронов с длиной волны более 5 Å длина свободного пробега нейтрона в жидком дейтерии резко возрастает, так что вытеснитель перестает играть существенную роль, приводя только к незначительному уменьшению яркости для нейтронов с длинами волн в диапазоне 11–13 Å.

Яркость камеры с вытеснителем для варианта 2 сравнивается с яркостью камеры с вытеснителем для варианта 1 на рис. 3. Как следует из сравнения, яркость камеры для варианта 1 превышает яркость камеры для варианта 2, особенно в области длин волн около 5 Å.

Яркость источника для вариантов 1 и 2 сравнивается на рис. 3 с расчетной яркостью источника, расположенного в горизонтальном канале на реакторе в Гренобле. Камера ИХН в Гренобле представляет собой цилиндр с полусферическим

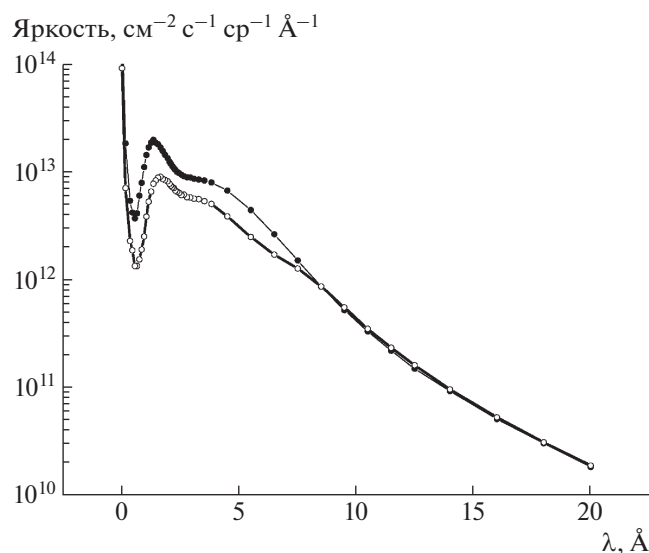


Рис. 2. Яркость ИХН для варианта 1. Открытые кружки — камера без вытеснителя; сплошные кружки для камеры с вытеснителем.

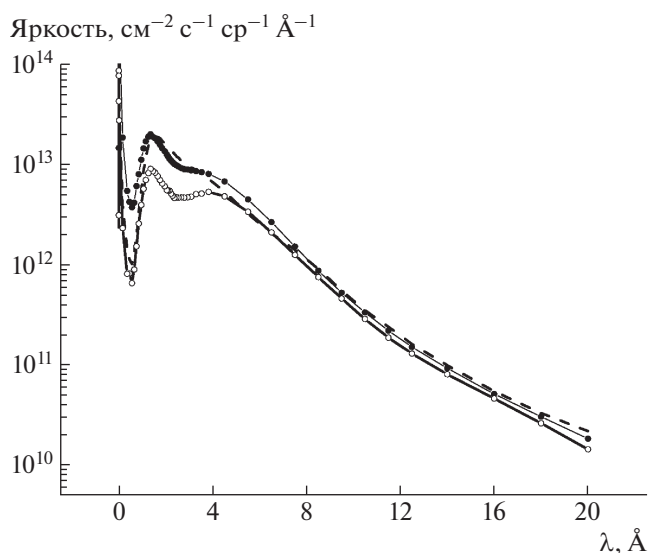


Рис. 3. Яркость ИХН. Закрытые кружки — вариант 1, камера с вытеснителем; открытые кружки — вариант 2, камера с вытеснителем; штриховая кривая — яркость ИХН в горизонтальном канале высокопоточного реактора в Гренобле.

ми донышками без вытеснителя. Диаметр камеры источника равен 220 мм с учетом толщины. Вытеснитель в камере не используется, так как канал небольшого диаметра, а объем жидкого дейтерия в камере всего 5.2 литра. Вместе с тем, камера ИХН расположена достаточно близко от активной зоны, так что плотность невозмущенного потока тепловых нейтронов в этом месте больше, чем в варианте 2 расположения камеры в реакторе ПИК. Это приводит к тому, что яркость источника в Гренобле выше, чем яркость источника в реакторе ПИК для варианта 2, но меньше, чем для для варианта 1.

В качестве меры сравнения яркостей источников можно использовать интегральную яркость — яркость источника по отношению к нейтронам с длинами волн более 4 Å. В табл. 3 приводится сравнение интегральных яркостей рассмотренных вариантов ИХН.

Из табл. 3 следует, что вытеснитель играет значительно большую роль в варианте 2. Здесь яркость камеры с вытеснителем превышает яркость камеры без вытеснителя в 2.5 раза. Для камеры меньших размеров варианта 1 выигрыш от вытеснителя составляет только 1.5 раза. Такое различие обусловлено, во-первых, тем фактом, что в большей камере варианта 2 плотность потока холодных нейтронов больше, чем в меньшей камере варианта 1, хотя она и находится ближе к активной зоне реактора. Во-вторых, имея больший размер в камере без вытеснителя варианта 2, поток нейтронов сильнее спадает от центра камеры к ее поверхности, чем для камеры меньшего размера варианта 1.

3. РАСЧЕТЫ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ ВО ВНУТРИКАНАЛЬНОЙ ВСТАВКЕ ИХН

Вклад в энерговыделение в материалах внутриканальной вставки обусловлен взаимодействием с нейтронами и гамма-квантами, кроме того, захват нейтрона ядрами ^{27}Al приводит к образованию короткоживущего ядра ^{28}Al с периодом полураспада 2.245 мин. β -распад ядра сопровождается испусканием электрона со средней энергией 1241.8 кэВ, а также γ -кванта с энергией 1779 кэВ. Поскольку жидкий дейтерий замедляет нейтроны в отражателе, а сечение реакции (n, γ) на ядре ^{27}Al зависит от скорости нейтрона как $(1/v)$, то вклад распадных электронов и γ -квантов в энерговыделение в камере источника оказывается существенным.

Другим важным источником энерговыделения являются запаздывающие γ -кванты, испускаемые продуктами деления в активной зоне. Вклад запаздывающего излучения в энерговыделение в камере и подводящих трубах рассчитывался отдельно в дополнение к энерговыделению от

Таблица 3. Интегральные яркости ИХН, $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1}$

Реактор	Вытеснителя нет	Вытеснитель есть
HFR, Гренобль	$1.48 \cdot 10^{13}$	—
ПИК, вариант № 1	$1.21 \cdot 10^{13}$	$1.80 \cdot 10^{13}$
ПИК, вариант, № 2	$5.5 \cdot 10^{12}$	$1.36 \cdot 10^{13}$

Таблица 4. Полные энерговыделения в камере (вариант 1), Вт

	Корпус	LD ₂	Сумма	Относительный вклад, %
β	1298 $\pm$ 5	—	1298	16.5
n	14.67 $\pm$ 0.25	747 $\pm$ 11	762	9.7
γ	3955 $\pm$ 15	1858 $\pm$ 7	5813	73.8
Всего	5268	2605	7873	

Таблица 5. Полные энерговыделения в камере (вариант 2), Вт

	Корпус	LD ₂	Сумма	Относительный вклад, %
β	1347 $\pm$ 6	—	1347	23.75
$n + \gamma$	2730 $\pm$ 14	1594 $\pm$ 9	4324	76.25
Всего	4077	1574	5671	

мгновенных нейтронов и гамма-квантов деления. Энерговыделение от мгновенных нейтронов и гамма-квантов деления рассчитывалось по коду MCNP. Также в расчете по коду MCNP учитываются мгновенные захватные гамма-кванты, возникающие в реакции (n, γ) в конструкционных материалах активной зоны и отражателях реактора.

Расчетное энерговыделение в материалах корпуса камеры ИХН, а также в жидком дейтерии внутри камеры для вариантов 1 и 2 представлено в табл. 4 и 5, соответственно. Как следует из таблиц, основной вклад в энерговыделение дают гамма-кванты (более 70%). Существенный вклад, порядка 16–24%, вносит также энерговыделение β -излучения. Вклад нейтронов не превышает 10% и обусловлен в основном энерговыделением в жидком дейтерии. В табл. 6 приведено сравнение удельных энерговыделений в материалах дейтериевой камеры для двух вариантов расположения ее в отражателе реактора.

Сравнение удельных энерговыделений для двух рассматриваемых вариантов расположения камер показывает, что при удалении от центра активной зоны они быстро спадают. Особенно сильное падение наблюдается для удельного

энерговыделения в жидком дейтерии, что в значительной мере обусловлено редким спадом плотности потока быстрых нейтронов в отражателе при удалении от центра активной зоны. Хотя объем камеры для варианта 2 существенно больше, общее энерговыделение в ней меньше на 28%.

Отдельно было рассчитано энерговыделение в двух подводящих трубах для вариантов 1 и 2. Подводящие трубы имеют коаксиальное строение с диаметром наружной трубы 60 мм и внутренней трубы 42 мм. Толщина трубок — 2 мм. Внутренняя труба используется для подвода и отвода дейтерия, а в зазоре между внешней и внутренней трубками прокачивается холодный гелий. Отдельно имеется подводящая и отводящая гелий и жидкий дейтерий система труб. Общее энерговыделение в самих трубках, выполненных из сплава АМг5, составило 833 Вт для варианта 1 и 805 Вт для варианта 2. Энерговыделение в жидком дейтерии внутри трубок для варианта 1 составляет 133 Вт и 61 Вт для варианта 2. Таким образом, полное энерговыделение в системе камера с подводящими трубками оценивается величиной 6540 Вт для варианта 2, что с учетом общей заявленной точности расчета энерговыделения по программе MCNP 15% имеет погрешность порядка одного киловатта. Полное энерговыделение в камере и подводящих трубках для варианта 1 составляет 9840 Вт с точностью расчета 1480 Вт.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Рассмотрена возможность создания ИХН на основе канала ГЭК-2 реактора ПИК. Было рассмотрено два варианта расположения камеры источника в отражателе. Для двух вариантов расположения камер были рассчитаны яркости источников на основе жидкого дейтерия, а также энерговыделение в них. Для варианта 1, когда камера источника располагается на 51.4 см от центра активной зоны, энерговыделения в материалах камеры превышают таковые для камеры, расположенной на расстоянии 69.4 см от центра активной зоны, примерно вдвое. Имея вдвое больший объем, камера варианта 2 имеет меньшее суммарное энерговыделение, чем камера в варианте 1. С учетом подводящих дейтерий и гелий труб суммарное энерговыделение в камере

Таблица 6. Сравнение удельных энерговыделений в материалах дейтериевой камеры для двух вариантов ее расположения в отражателе

Материал	Вариант 1		Вариант 2	
	масса, г	удельное энерговыделение, Вт/г	масса, г	удельное энерговыделение, Вт/г
Оболочка камеры	2585	2.04	4062	1.34
Жидкий дейтерий	1459	1.79	2290	0.70

для первого варианта составляет величину 10 кВт с точностью в 1.5 кВт, а для второго варианта составляет величину 6.5 кВт с точностью расчета порядка 1 кВт. Таким образом, энерговыделение во внутриканальной вставке первого варианта превышает энерговыделение во втором варианте на 54%. При этом яркость ИХН для варианта 1 больше яркости ИХН для варианта 2 на 32%.

Яркость ИХН для варианта 1 превышает яркость источника в высокопоточном реакторе в Гренобле (больше на 20%). Таким образом, в канале ГЭК-2 реактора ПИК может быть размещен ИХН рекордной яркости. При этом энерговыделение в таком источнике составит величину 10 кВт.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Ю. Калзавара (Y. Calzavara) (ИЛЛ, Гренобль), любезно предоставившего компьютерную модель реактора в ИЛЛ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Erykalov A.N., Kolesnichenko O.A., Konoplev K.A., Nazarenko V.A. et al. // Preprint PNPI No. 1784. 1992. Gatchina: PNPI.
2. Mezei F., Zanini L., Takibaev A., Batkov K., et al. // J. Neutron Res. 2014. V. 17. P. 101.
3. Ageron P. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 1989. V. 284. P. 197.
4. Bonneton M., Lovotti O., Mityukhlyayev V., Thiering R. // Proc. 10th Meeting Int. Group of the Research Reactors (IGGOR 10). Sept. 2005, Washington, USA; Mityukhlyayev V., Onegin M., Potapov I., Serebrov A., Firsov A., Lu W., Thiering R. // Preprint PNPI. No. 2822. 2009. Gatchina: PNPI.
5. Shen F., Yuan L. // Phys. B. (Amsterdam, Neth.). 2002. V. 311. P. 152.
6. MCNP6. Report No. LA-CP-00634. 2013. Los Alamos Natl. Labor.
7. Van Hove L. // Phys. Rev. 1954. V. 95. P. 249.
8. Mughabghab S.F. Atlas of Neutron Resonances. 5th ed. 2006. Amsterdam.
9. Young J. A., Koppel J.U. // Phys. Rev. 1964. V. 135. P. 603.
10. Mac Farlane R.E. Report LA-12639-MS. 1994. Los Alamos Natl. Labor.
11. Keinert J., Sax J. // Kerntechnik. 1987. V. 51. P. 19.
12. Vineyard G.H. // J. Phys. Chem Solids. 1957. V. 3. No. 1–2. P. 121.
13. Mityukhlyayev V.A., Onegin M.S., Markushin D.G., Solovay V.L. et al. // Preprint PNPI. No. 2959. 2014. Gatchina: PNPI.

High Brilliance Cold Neutron Source Development for HEC-2 Channel of Reactor PIK

V. A. Mityukhlyayev¹ and M. S. Onegin¹, *

¹Petersburg Nuclear Physics Institute, Nuclear Research Centre “Kurchatov Institute”,
Gatchina, Leningrad oblast, 188300 Russia

*e-mail: onegin-ms@pnpi.nrcki.ru

Received December 20, 2021; revised December 21, 2021; accepted December 27, 2021

Abstract—Cold neutron source with liquid deuterium moderator for the HEC-2 channel of PIK reactor is considered. Two variants of moderator chamber location in the reactor reflector are compared. It is shown, that the energy release in the chamber strongly increases when it approaches the reactor core. At the same time, the brilliance of the source increases only moderately. The great influence of the displacer in the liquid deuterium chamber of large volume is demonstrated. Cold neutron source brilliance for two positions of the chamber in the reflector is calculated as well as energy release in the chamber and supplying tubes. The cold neutron source with total heat release in the in-pile constructions about 10 kW can reach the record brilliance compared to brilliance of other cold neutron sources in the world.

Keywords: cold neutron source, neutron source brilliance, PIK reactor, liquid deuterium