

DOI: 10.18721/JPM.12106  
УДК 536.24

## **ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ РАСЧЕТ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЧАСТИ ИСТОЧНИКА УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ РЕАКТОРА ВВР-М**

**А.П. Серебров, В.А. Лямкин, А.О. Коптюхов, М.С. Онегин,  
Д.В. Прудников, О.Ю. Самодуров**

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ,  
г. Гатчина Ленинградской области, Российская Федерация

Представлены теплогидравлические расчеты низкотемпературной части источника ультрахолодных нейтронов (УХН) на реакторе ВВР-М, направленные на подбор оптимальных режимов работы всего технологического комплекса этого источника. Согласно расчетным данным, штатный рефрижератор Linde TCF-50 способен поддерживать рабочую температуру тепловых экранов и конденсацию 50 л дейтериевого предзамедлителя в камере. Результаты расчетов температурного поля теплового экрана, находящегося в низкотемпературной части источника УХН, были использованы для выбора места установки опорных конструкций для камеры со сверхтекучим гелием. Кроме того, была сделана оценка суммарного теплопритока к камере источника УХН, которая составила 35 Вт. Установлено, что производительность вакуумной системы для откачки паров гелия и гелиевого оживителя достаточна для поддержания 35 л сверхтекучего конвертора УХН.

**Ключевые слова:** источник ультрахолодных нейтронов, сверхтекучий гелий, реактор ВВР-М, суммарный теплоприток

**Ссылка при цитировании:** Серебров А.П., Лямкин В.А., Коптюхов А.О., Онегин М.С., Прудников Д.В., Самодуров О.Ю. Теплогидравлической расчет низкотемпературной части источника ультрахолодных нейтронов для реактора ВВР-М // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2019. Т. 12. №. 1 С. 73–86. DOI: 10.18721/JPM.12106

## **THE LOW-TEMPERATURE SUB-SYSTEM OF THE ULTRACOLD NEUTRON SUPERSOURCE AT THE WWR-M REACTOR: A HEAT-HYDRAULIC DESIGN STUDY**

**A.P. Serebrov, V.A. Lyamkin, A.O. Koptuyukhov,  
M.S. Onegin, D.V. Prudnikov, O.Yu. Samodurov**

NRC «Kurchatov Institute» – PNPI,  
Gatchina of Leningrad region, Russian Federation

Heat-hydraulic design studies of the low-temperature sub-system of the ultracold neutron (UCN) supersource at the WWR-M reactor have been presented in the paper. The studies were directed toward selection of the optimal working modes of the aggregate technological complex of this source. According to the calculation data, the Linde TCF-50 standard refrigerator was able to maintain the operating temperature of the thermal screens and the condensation of 50 liters of the deuterium pre-moderator in the chamber. Calculation results for the temperature field of the thermal shield placed in the low-temperature sub-system were used to select the location of the support structures for a superfluid helium vessel. Based on these calculations, an estimate of the total heat penetration at the UCN source chamber was made; it was equal to 35W. The capacity of the vacuum system for pumping the helium vapor and helium liquefier was established to be sufficient to maintain 35 liters of the superfluid UCN converter.

**Keywords:** ultracold neutron source, superfluid helium, WWR-M reactor

**Citation:** A.P. Serebrov, V.A. Lyamkin, A.O. Koptyukhov, M.S. Onegin, D.V. Prudnikov, O.Yu. Samodurov, The low-temperature sub-system of the ultracold neutron supersource at the WWR-M reactor: A heat-hydraulic design study, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics, 12 (1) (2019) 73–86. DOI: 10.18721/JPM.12106

### Введение

История создания источников холодных и ультрахолодных нейтронов (УХН) берет начало в 1970-х годах. Эффективное производство нейтронов с низкой энергией на исследовательском водо-водяном ядерном реакторе бассейнового типа (реакторный комплекс, сокращенно ВВР-М) неразрывно связано с использованием криогенной техники. Именно на реакторе ВВР-М пропускали реакторные нейтроны через низкотемпературные конверторы, такие как холодный бериллий [1], жидкий водород [2], жидкий дейтерий [3], твердый дейтерий [4], и таким путем получали высокие (для своего времени) плотности потоков УХН. При термализации нейтронов в среде с низкой температурой, долю УХН в спектре можно увеличивать в десятки и тысячи раз.

Однако для наиболее эффективной работы конвертора необходима температура замедлителя  $10^{-3}$  К, которая недостижима в условиях реакторного облучения. Ультрахолодные нейтроны образуются из тепловых не в результате их дополнительного замедления, а в результате очень редкого процесса – единственного неупругого соударения, которое сопровождается потерей тепловым нейтроном практически всей его энергии [5].

Количественное производство УХН зависит от интенсивности реакторного нейтронного потока и эффективности криогенного замедлителя (конвертора). Однако стремление поместить замедлитель с криогенной температурой в высокий нейтронный поток на реакторе, наталкивается на проблему отвода радиационного тепла. Чем ниже температура замедлителя, тем сложнее проблема теплоотвода.

Настоящее исследование находится на передовых научных рубежах и предполагает высокий технический уровень практической реализации, поскольку затрагивает сверхнизкий температурный уровень (1,2 К) в условиях реакторного нагрева. Подобные устройства при таких низких температурах пока никто не размещал внутри каналов реактора.

При эксплуатации реактора ВВР-М

имеется уникальная возможность создания условий низкого тепловыделения при достаточно высоком потоке холодных нейтронов ( $4,8 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ ). Эту задачу можно реализовать в нише так называемой тепловой колонны, которая представляет собой канал большого диаметра (1 м), примыкающий к активной зоне реактора [6, 7]. Большой диаметр канала позволит смонтировать защиту из свинца толщиной 10 см для снижения уровня тепловыделения, предзамедлитель из жидкого дейтерия при температуре 20 – 23 К для получения холодных нейтронов и, наконец, конвертер холодных нейтронов в ультрахолодные из сверхтекучего гелия объемом 35 л при температуре 1,2 К.

Подобное расположение позволит достичь уровня теплопритоков к сверхтекучему гелию мощностью не более 35 Вт (рис. 1). В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ (Петербургский институт ядерной физики, г. Гатчина Ленинградской области, Россия) имеется система вакуумной откачки, производительность которой достаточна для отвода данного количества тепла. В совокупности с криогенными установками фирмы «Линде Инжиниринг Рус» (немецкая транснациональная компания), данный технологический комплекс способен обеспечивать стабильную работу источника УХН на реакторе ВВР-М. Приведем технические характеристики реактора ВВР-М.

#### Технические характеристики реактора ВВР-М

Мощность .....16 МВт

Поток тепловых нейтронов.... $10^{14} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$

Поток холодных нейтронов  
в сверхтекучем гелии ....  $4,8 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$

Плотность УХН  
в сверхтекучем гелии .....  $10^4 \text{ см}^{-3}$

Проектная документация внутриканальной части источника УХН на реакторе ВВР-М была разработана в рамках



Рис. 1. Расположение источника ультрахолодных нейтронов (УХН) в тепловой колонне реактора ВВР-М:

- 1 – камера со сверхтекучим гелием, 2 – камера с жидким дейтерием,  
 3 – графитовый предзамедлитель, 4 – свинцовая защита,  
 5 – активная зона реактора ВВР-М.

Значения основных параметров комплекса приведены в табл. 1 и в тексте

Таблица 1

**Основные физические характеристики составляющих  
 внутриканальной части источника УХН**

Параметр	Значение			
	Сверхтекучий гелий	Жидкий дейтерий	Графитовый предзамедлитель	Свинцовый экран
Температура, К	1,2	20	300	300
Энерговыведение, Вт	35	287	700	15000

государственного контракта (№ 1215 от 20 октября 2010 года). Однако при разработке конструкторской документации проект претерпел некоторые изменения, поскольку вводились новые технические решения, направленные, по большей части, на обеспечение безопасной эксплуатации источника УХН. Была поставлена задача перерасчета низкотемпературного контура. Требуемый расчет производился на основании предоставленной конструкторской документации.

### Общее описание низкотемпературной части источника УХН

Составные узлы низкотемпературной части (НТЧ) источника УХН изготовлены из алюминиевого сплава АМг6. НТЧ состоит из трех основных частей: дейтериевого контура, гелиевого контура и теплового экрана.

Первый контур представляет собой замкнутую систему, в которую входят рабочий ресивер, трубопроводы и камера дейтериевого предзамедлителя. Указанная камера заключена в оболочку из газообразного гелия с температурой примерно 20 К. Исследования [8] показывают, что в холодном режиме, при давлении в дейтериевом контуре  $P_w = 1,5$  ата, температура кипения равновесного дейтерия составляет 24,12 К. В то же время важнейшим критерием безопасности источника является отсутствие локальных образований твердого дейтерия. В противном случае такие образования могут привести к закупориванию трубопроводов и, при повышении тепловой нагрузки на дейтериевую камеру, создать в ней давление, достаточное для разрыва контейнера с предзамедлителем. Таким образом, температуру дейтерия в дейтериевой камере следует поддерживать строго в диапазоне 18,73 – 24,12 К (18,73 К – тройная точка равновесного дейтерия). Гелиевая оболочка, обеспечивающая конденсацию дейтерия, одновременно выполняет функцию водородной безопасности, препятствуя образованию водородно-воздушной смеси.

Камера дейтериевого предзамедлителя (ДК) состоит из внутренней дейтериевой и внешней гелиевой оболочек (рис. 2). ДК имеет три патрубка: один для приварки дейтериевой трубы с окружающей ее гелиевой трубой и два для двух гелиевых труб охлаждения ДК. Дейтериевая труба находится в верхней части дейтериевой камеры для того, чтобы дейтерий беспрепятственно

испарялся из этой камеры при переходе дейтериевого контура в «теплый» режим. Для обеспечения равномерного обдува гелием ДК, в ее задней части имеется коллектор, представляющий собой кольцевой зазор, соединенный с остальной гелиевой полостью ДК через 16 отверстий диаметром 5 мм. Коллектор установлен как на участке подачи гелия, так и на участке его отвода от ДК. Дейтериевая оболочка камеры в ее передней части имеет отверстие, соединяющее гелиевые полости подачи и возврата охлаждающего гелия.

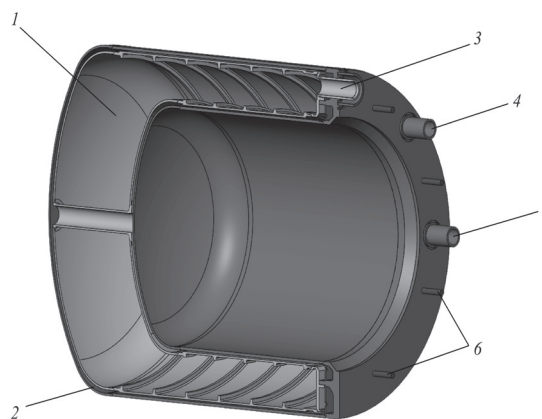


Рис. 2. Дейтериевая камера (в разрезе): 1 – объем с жидким дейтерием; 2 – его гелиевая оболочка; 3 – канал подачи и возврата дейтерия; 4, 5 – каналы подачи и возврата гелия соответственно; 6 – шпильки крепления камеры с дейтерием к теплому экрану

Охлаждающий гелий подается в дейтериевую камеру через патрубок. Затем он поступает в коллектор, равномерно в нем распределяется и поступает в кольцевой зазор, образованный внутренней дейтериевой и внутренней гелиевой оболочками. Далее гелий движется к передней части ДК и через отверстие в дейтериевой оболочке перетекает в зазор, образованный внешней дейтериевой и внешней гелиевой оболочками. После этого гелий движется уже в противоположном направлении и равномерно поступает в отводящий коллектор, соединенный с выходным патрубком.

Для поддержания температуры теплового экрана на уровне 20 К и для конденсации дейтерия в дейтериевой камере, применяется гелиевый рефрижератор TCF-50. Помимо дейтериевого контура, рефрижератор должен обеспечивать рабочую температуру (не более 20 К) тепловых экранов криостата для производства сверхтекучего гелия. Для

обеспечения максимальной надежности была выбрана последовательная схема подключения дейтериевого контура и криостата к рефрижератору (рис. 3).

Технические характеристики рефрижератора TCF-50 (получены экспериментальным путем) приведены в табл. 2

В результате двухступенчатого адиабатического расширения, на турбодетандерах рефрижератора образуется поток холодного гелия  $G = 108$  г/с при температуре  $T_{3165} = 10,5$  К и давлении  $P_{3165} = 2,5$  ата (см. рис. 3). Давление  $P_{3165}$  устанавливается в автоматическом режиме, благодаря вентилю CV-3175. Вентилем CV-3170 выполняется настройка потока гелия на НТЧ.

По сигналу автоматики вентиль CV-3290 открывается при пуске рабочего режима эксплуатации рефрижератора. Встроенный в рефрижератор нагреватель R3270 обеспечивает возврат гелия после эксперимента на уровне  $T_{3240} = 21$  К. Таким образом устанавливается стационарный режим работы рефрижератора.

После рефрижератора гелий поступает на охлаждение тепловых экранов криостата. Система охлаждения теплового экрана криостата имеет два параллельно смонтированных трубопровода с условным диаметром 14 мм и длиной 6 м каждый. Данные экраны поддерживают гелий в нижней и сливной ваннах криостата на уровне 1,2 К.

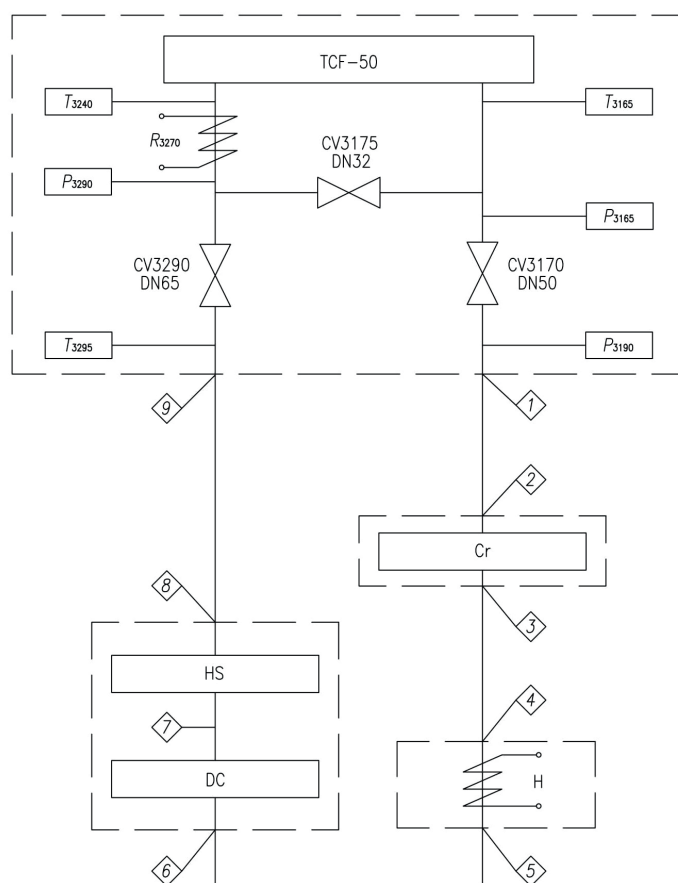


Рис. 3. Принципиальная схема низкотемпературного контура охлаждения: TCF-50 – гелиевый рефрижератор, HS – тепловой экран, DC – дейтериевая камера, Cr – криостат, H – нагреватель; CVkkkk – вентили, DNkk – условный диаметр вентиля; Tkkkk, Pkkkk – обозначения температуры и давления соответственно; R3270 – нагреватель для возврата гелия; узловые точки пронумерованы цифрами в квадратах

Таблица 2  
Технические характеристики  
гелиевого рефрижератора  
ТСФ- 50

Параметр	Значение
Поток гелия, г/с	108
Давление, ата на входе на выходе	$\geq 1,5$ 2,5
Температура, К на входе на выходе	$\leq 21,0$ 10,6
Тепловая нагрузка при $T=20$ К, кВт	3

После криостата гелий поступает в нагреватель. В нагревателе происходит нагрев гелия до температуры  $T = 20$  К. Данная температура поддерживается для того, чтобы исключить образование дейтерия в твердой фазе, так как это может привести к закупориванию дейтериевого трубопровода с его последующим разрывом.

После нагревателя гелий поступает в источник УХН, где он сначала идет в дейтериевую камеру на конденсацию газообразного дейтерия, а затем на охлаждение теплового экрана источника УХН.

Геометрические характеристики трубопроводов НКО приведены в табл. 3.

#### Расчет теплопритоков к низкотемпературной части источника УХН

К низкотемпературной части (НТЧ) источника УХН предъявляются следующие требования:

гидравлическое сопротивление всех трубопроводов НТЧ должно быть не более 1 атм;

температура гелия  $T_{3240}$  (см. рис. 3) должна быть не более 21 К;

температура дейтерия должна быть выше точки затвердевания, но ниже точки конденсации;

теплоприток к НТЧ должен быть более 3 кВт на температурном уровне 20 К.

В качестве источника по основным уравнениям гидравлики и теплопередачи был использован справочник [9].

Теплопритоки к низкотемпературным конструкциям источника УХН осуществляются преимущественно по трем каналам: через вакуумную изоляцию, по тепловому мосту и от реакторного излучения.

Теплоприток через вакуумную теплоизоляцию определяется лучистым теплообменом от «теплой» поверхности вакуумного кожуха к «холодной» поверхности НТЧ:

$$Q_{rad} = \varepsilon_{ef} C \cdot 10^{-18} (T_1^4 - T_2^4) \cdot S_c,$$

где  $\varepsilon_{ef}$  – приведенная степень черноты;  $C$  – постоянная излучения для абсолютно черного тела ( $C = 5,77$  Вт/(м<sup>2</sup>·К));  $S_c$ , м<sup>2</sup>, – площадь наружной поверхности «холодного» тела;  $T_1, T_2$ , К, – температуры «теплой» и «холодной» поверхностей ( $T_1 = 300$  К,  $T_2 = 20$  К).

Приведенная степень черноты вычислена по формуле

$$\varepsilon_{red} = \left( \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1} = 0,028,$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – степени черноты «теплой» и «холодной» поверхностей; в данном случае для полированного алюминия  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,055$  [9].

Тепловыми мостами к НТЧ служат опорные конструкции низкотемпературной части, трубопроводы холодного гелия и дейтерия, а также нейтроновод УХН.

Для расчетов теплопритоков через тепловые мосты следует использовать формулу

$$Q_{TC} = \frac{\lambda S_b}{L} (T_1 - T_2),$$

где  $\lambda$ , Вт/(см·К), – теплопроводность материала опорной конструкции (для алюминиевого сплава АМг6  $\lambda = 0,75$  Вт/(см·К) при  $T_{av} = 173$  К);  $T_1, T_2$ , К, – температуры «теплого» и «холодного» концов моста ( $T_1 = 300$  К,  $T_2 = 20$  К);  $S_b$ , м<sup>2</sup>, – площадь поперечного сечения моста;  $L$ , м, – длина моста.

Энерговыделения в конструктивных элементах источника УХН непосредственно от реактора вызывают гамма-кванты и нейтроны. Основным источником гамма-излучения является активная зона реактора; кроме того, оно генерируется в процессе захвата нейтронов ядрами конструктивных материалов. В активной зоне реактора генерация гамма-излучения происходит при делении ядер; осколки деления также излучают гамма-кванты.

Таблица 3  
Геометрические характеристики гелиевых трубопроводов НКО

Позиция на рис. 3	Назначение трубопровода	Условный диаметр, мм	Длина, м
1-2	Подача гелия от рефрижератора на криостат	50	6,000
2-3	Охлаждение теплового экрана криостата	14	6,000
3-4	Подача гелия от криостата на нагреватель	50	6,000
4-5	Нагрев теплоносителя	–	–
5-6	Подача гелия от нагревателя на ДК	22	5,000
6-7	Охлаждение дейтерия в ДК	–	–
7-8	Охлаждение теплового экрана источника УХН	22	15,000
8-9	Возврат гелия от источника УХН на рефрижератор	50	6,000

Принятые сокращения: НКО – низкотемпературный контур охлаждения, УХН – ультрахолодные нейтроны, ДК – дейтериевая камера.

Нейтронно-физический расчет ядерного реактора ВВР-М с источником УХН осуществлялся методом Монте-Карло по программе MCNP-4C [10]. Расчетная модель оптимизировалась с целью получения максимальной плотности потока нейтронов с длиной волны 9Å в сверхтекучем гелии. Мощность реактора принималась равной 16 МВт.

Расчетные суммарные теплопритоки к дейтериевой камере и теплового экрану представлены в табл. 4.

Перепад температур теплоносителя в дейтериевой камере определяется по формуле

$$\Delta T_{DK} = \frac{Q_{\Sigma DC}}{Gc_p} = 1,19 \text{ К},$$

а перепад температур теплоносителя на тепловом экране – по формуле

$$\Delta T_{HS} = \frac{Q_{\Sigma HS}}{Gc_p} = 1,74 \text{ К},$$

где  $G$ , г/с, – принятый массовый расход гелия ( $G = 50$  г/с);  $c_p$ , Дж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>, – теплоемкость гелия при  $T_2 = 20$  К ( $c_p = 5,3 \cdot 10^3$  Дж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>);  $Q_{\Sigma DC}$ ,  $Q_{\Sigma HS}$ , Вт, – суммарный теплоприток к дейтериевой камере и теплового экрану соответственно.

#### Теплогидравлический расчет низкотемпературной части источника

Для расчета гидравлических сопротивлений  $\Delta P_{pip}$  в трубопроводах используется формула Дарси – Вейсбаха:

$$\Delta P_{pip} = \frac{\lambda_f l w^2 \rho}{2d},$$

где  $l$ ,  $d$ , мм, – длина и внутренний диаметр трубопровода;  $w$ , м/с, – скорость течения в нем газа;  $\lambda_f$  – коэффициент трения;  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>, – плотность газа (гелий).

Плотность  $\rho$  рассчитывается с учетом абсолютного давления и температуры газа:

$$\rho = \frac{PM}{RT}.$$

Скорость гелия в трубопроводе выражается как

$$w = \frac{G}{\rho S},$$

где  $S$ , м<sup>2</sup>, – площадь поперечного сечения трубопровода.

Коэффициент трения  $\lambda_f$  вычисляется с учетом его зависимости от величины числа Рейнольдса.

Таблица 4  
Картина расчетных теплопритоков к двум узлам НКО

Источник теплопритока	Канал теплопередачи	Теплоприток, Вт	
		ДК	ТЭ
Через вакуумную изоляцию	Лучистый теплообмен	24,00	88,00
По тепловому мосту	Дейтериевый трубопровод	2,45	–
	Трубки охлаждения паров дейтерия и ТЭ	–	22,00
	Трубки откачки паров гелия	–	2,28
	2 опорных колеса	–	89,23
	2 опорных кронштейна	–	214,12
	Нейтронотвод УХН	–	26,00
Реакторное излучение	К алюминиевому корпусу	204,00	20,15
	К жидкому дейтерию	83,00	–
Суммарный теплоприток, Вт		<b>313,45</b>	<b>461,78</b>

Принятые сокращения: ДК – дейтериевая камера, ТЭ – тепловой экран.

Для зоны доквадратичного сопротивления, когда

$$20 \frac{d}{\Delta} < Re < 500 \frac{d}{\Delta}$$

( $\Delta$ , мм, – абсолютная шероховатость труб; для алюминия  $\Delta = 0,06$  мм),  $\lambda_f$  вычисляется по формуле Альтшуля:

$$\lambda_f = 0,11 \cdot \left( \frac{\Delta}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25};$$

для квадратичного сопротивления, когда  $Re > 500 \frac{d}{\Delta}$ ,  $\lambda_f$  вычисляется по формуле Шифринсона:

$$\lambda_f = 0,11 \cdot \left( \frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}.$$

При этом число Рейнольдса, критерий режима течения, рассчитывается по формуле

$$Re = \frac{wd\rho}{\mu}, \quad (1)$$

где  $\mu$ , Па·с, – коэффициент динамической вязкости.

В формуле (1) коэффициент  $\mu$  для газообразного гелия можно определить по формуле Кеезома [9]:

$$\mu = 5,023 \cdot T^{0,647}.$$

При расчете полного гидравлического сопротивления трубопроводов необходимо также учитывать потери давления  $\Delta P_{loc}$  на местные сопротивления:

$$\Delta P_{loc} = \zeta \frac{\rho w^2}{2},$$

где  $\zeta$  – коэффициент местного сопротивления.

Коэффициент  $\zeta$  при повороте потока на угол  $\varphi$  определяется по формуле

$$\zeta = \left[ 0,131 + 0,16 \cdot \left( \frac{d}{R} \right)^{3,5} \right] \cdot \frac{\varphi}{90}.$$



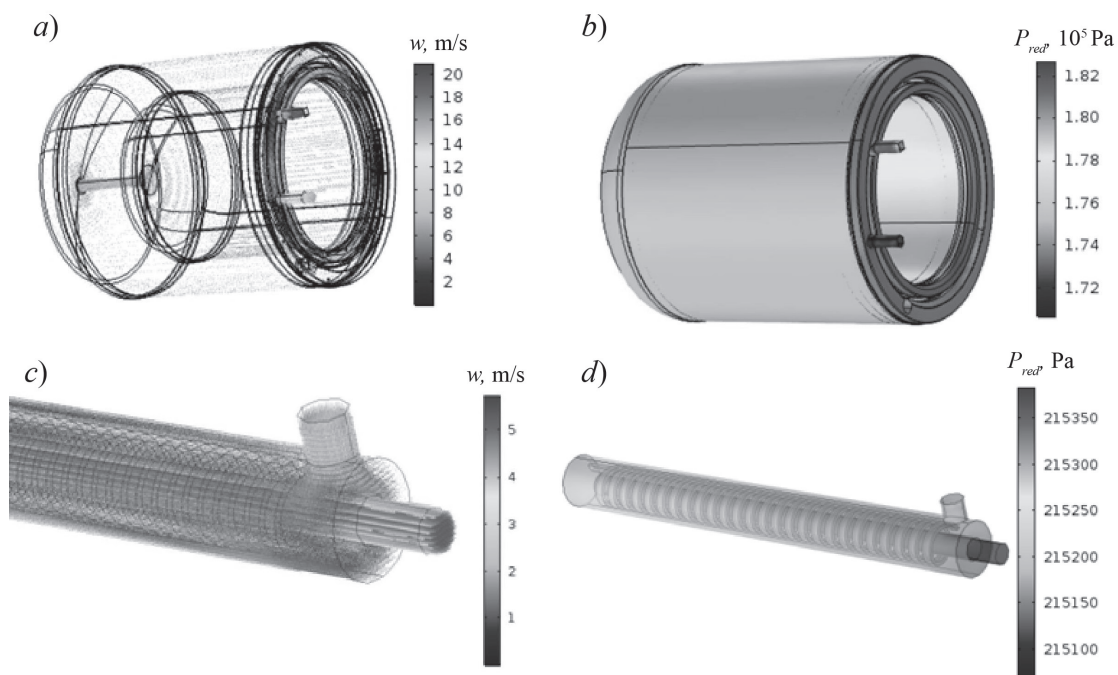


Рис. 4. Расчетные поля скорости теплоносителей (*a,c*) и абсолютного давления теплоносителей (*b,d*) для контуров охлаждения дейтериевой камеры (*a,b*) и нагревателя гелия (*c,d*)

Таблица 5

**Расчетные гидравлические сопротивления низкотемпературного контура источника УХН**

Назначение трубопровода (номера на рис. 3)	Скорость гелия в трубопроводе, м/с	Потеря давления на трение, Па
Возврат гелия в рефрижератор (8–9)	7,92	302
Охлаждение теплового экрана НТЧ (7–8)	29,86	37798
Охлаждение дейтериевой камеры (6–7)	4,54	17288
Подача гелия к дейтериевой камере от нагревателя (5–6)	25,21	9676
Нагрев гелия (4 –5)	2,47	183
Подача гелия от криостата к нагревателю (3–4)	2,80	107
Охлаждение тепловогоэкрана криостата (2–3)	16,30	11248
Подача гелия в криостатот рефрижератора (1–2)	2,43	94
Суммарное значение потерь давления, Па		<b>76696</b>

Примечание. Представлены расчетные результаты для значения массового расхода гелия  $G = 50$  г/с.

Следует особо отметить расчет гидравлических сопротивлений контура охлаждения дейтериевой камеры и контура нагревателя гелия, который располагается перед входом в дейтериевую камеру и обеспечивает точную температуру подачи гелия на конденсацию дейтерия в диапазоне 20 – 24 К. Эти контуры имеют сложную геометрическую форму, поэтому их расчет производился в пакете COMSOL Multiphysics 5.2a. Результаты расчетов представлены на рис. 4.

Результаты гидравлического расчета низкотемпературного контура источника УХН на реакторе ВВР-М представлены в табл. 5. Нумерация трубопроводов указана в соответствии со схемой, представленной на рис. 3.

Значение итогового гидравлического сопротивления контура НТЧ  $\Delta P_T = 76,7$  кПа оказалось меньше такового для гидравлического сопротивления, указанного в паспорте к рефрижератору TCF-50 (100 кПа). Таким образом, проделанный гидравлический расчет показал способность контура НТЧ работать при массовом расходе гелия  $G = 50$  г/с.

Тепловые расчеты для камеры жидкодейтериевого предзамедлителя при потоке гелия в оболочке  $G = 50$  г/с дают значение средней температуры стенки камеры, равное 22,83 К (рис. 5).

На рис. 6 представлена расчетная зависимость максимальной температуры дейтерия от массового расхода гелия. При потоке гелия в  $G = 50$  г/с, максимальная температура дейтерия составляет 23 К. Поскольку при

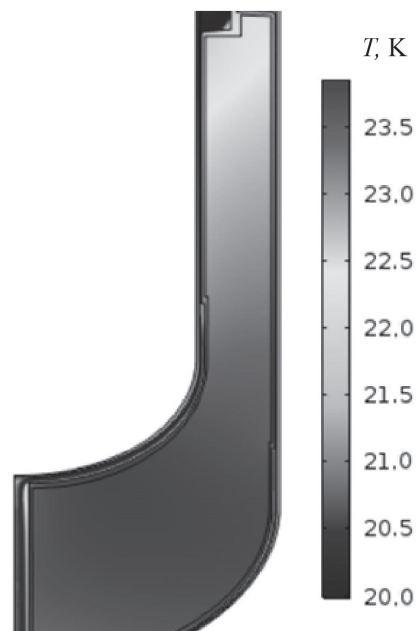


Рис. 5. Расчетное распределение температуры дейтерия в дейтериевой камере

давлении в дейтериевом контуре, равном 1,5 ата, температура кипения равновесного дейтерия составляет  $T = 24,12$  К, то из данного расчета можно заключить, что данная схема НТЧ обеспечит в камере переход всего дейтерия в жидкую фазу.

Температурное поле было также рассчитано для всей поверхности теплового экрана (рис. 7).

На основании этого расчета, в местах с минимальной температурой поверхности теплового экрана были найдены опорные точки для установки гелиевого модуля со

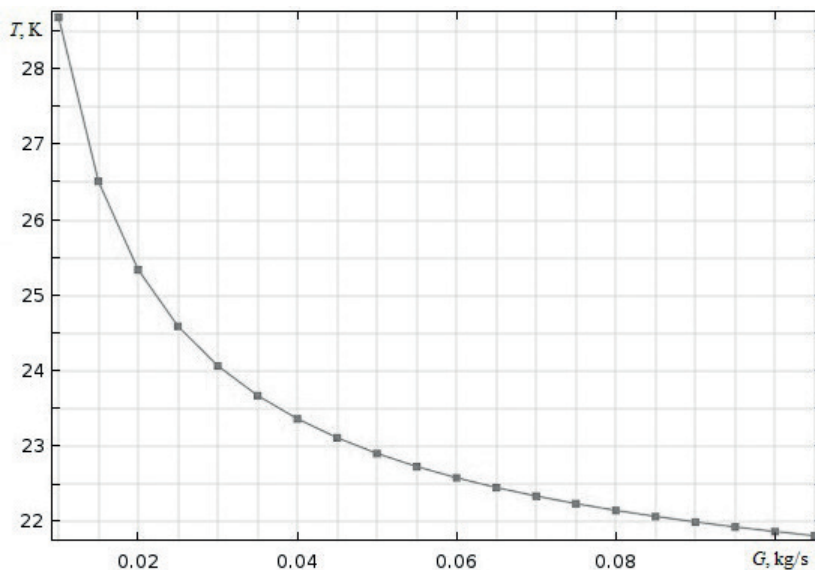


Рис. 6. Расчетная зависимость максимальной температуры дейтерия от массового расхода гелия

сверхтекучим гелием. От величины теплопритоков к гелиевой камере зависит температура сверхтекучего гелия в камере источника, что в свою очередь сильно влияет на время жизни нейтронов. Таким образом, теплопритоки к сверхтекучему гелию непосредственно влияют на качество источника УХН на реакторе ВВР-М.

С помощью наших расчетов было установлено, что величину теплоприто-

ка от реакторного излучения можно существенно уменьшить, если отодвинуть источник УХН от активной зоны на 25 см. Так, величина теплопритоков к камере со сверхтекучим гелием составила 35,89 Вт для случая установки источника УХН вплотную к активной зоне реактора и 22,34 Вт при откате этого источника от указанной активной зоны на 25 см (табл. 6).

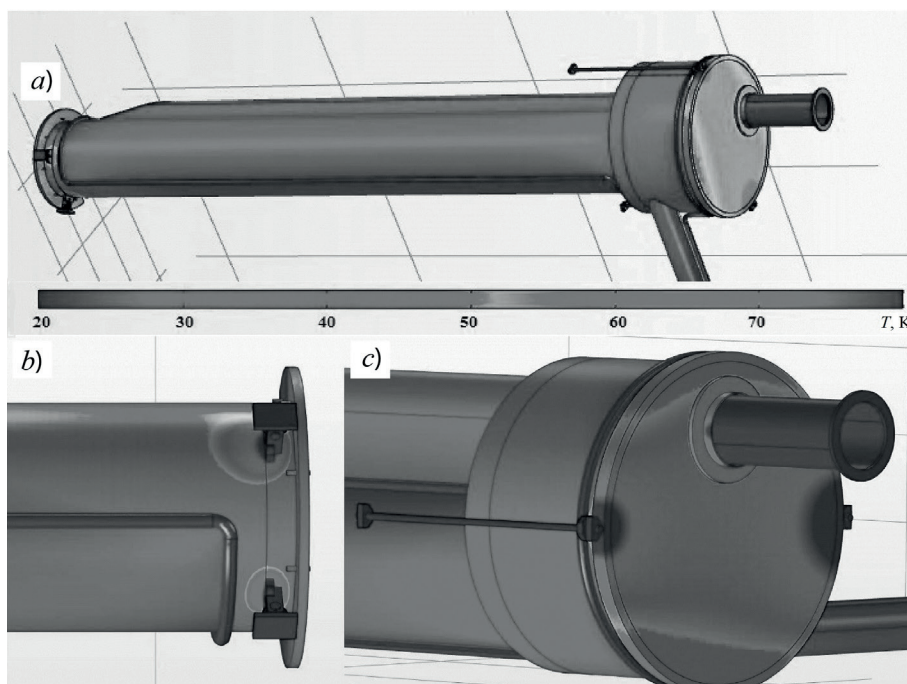


Рис. 7. Расчетные распределения температуры по теплому экрану источника УХН (a) и по его фрагментам: в районе опорных колес (b), а также опорных кронштейнов и нейтронвода УХН (c)

Таблица 6

**Зависимость теплопритока к гелиевой камере от ее позиции относительно ядерного реактора**

Источник теплопритока	Канал теплопередачи	Теплоприток, Вт	
		Исходная позиция	Сдвиг на 25 см
Через вакуумную изоляцию	Лучистый теплообмен	10 <sup>-3</sup>	
По теплому мосту	Опоры гелиевой камеры	0,71	
Реакторное излучение	К алюминиевому корпусу	17,18	10,28
	К жидкому гелию	18,00	11,35
Суммарный теплоприток, Вт		<b>35,89</b>	<b>22,34</b>

### Заключение

В настоящей статье представлены тепло-гидравлические исследовательские расчеты низкотемпературной части (НТЧ) источника ультрахолодных нейтронов (УХН) на реакторе ВВР-М. Расчеты выполнены на основании разработанной ранее конструкторской документации. В результате проведенной работы получены следующие результаты.

Показано, что за счет всевозможных теплопритоков к НТЧ, при мощности реактора в 16 МВт, в сверхтекучем гелии (конвертор холодных нейтронов в ультрахолодные) будет выделяться мощность 35 Вт; при этом тепловая нагрузка на низкотемпературный контур НТЧ составит 775 Вт. Охлаждение НТЧ происходит за счет потока холодного гелия величиной  $G = 50$  г/с.

Система трубопроводов НТЧ спроектирована таким образом, чтобы обеспечить

необходимую пропускную способность для указанного потока жидкого и газообразного гелия. Установлено, что гелиевый рефрижератор ТСФ-50 обеспечит оптимальную работу источника УХН на реакторе ВВР-М. Согласно проведенным расчетам, максимальная температура дейтерия в источнике УХН составит 23 К. Такая температура при рабочем давлении  $P_w = 1,5$  ата гарантирует переход дейтериевого предзамедлителя в жидкую фазу.

Проведенные расчеты позволяют перейти к изготовлению низкотемпературной части источника УХН на реакторе ВВР-М.

Исследование выполнено в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект №14-22-00105).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Altarev I.S., Egorov A.I., Ezhov V.F., et al. An investigation of the effect of the converter cooling upon the yield of ultracold neutrons and development of a cooled source of ultracold neutrons. Preprint PNPI-246. Gatchina: PNPI, 1976. 17 p.
2. Altarev I.S., Borisov Yu.V., Brandlin A.B., et al. A liquid hydrogen source of ultra-cold neutrons // Physics Letters. A. 1980. Vol. 80. No. 5–6. Pp. 413–416.
3. Алтарев И.С., Боровикова Н.В., Булкин А.П. и др. Универсальный жидководородный источник поляризованных холодных и ультрахолодных нейтронов на реакторе ВВР-М ПИЯФ // Письма в ЖЭТФ. 1986. Т. 44. Вып. 6. С. 269–272.
4. Серебров А.П., Митюхляев В.А., Захаров А.А., Харитонов А.Г., Несвижевский В.В., Ласаков М.С., Тальдаев Р.Р., Алдушенков А.В., Варламов В.Е., Васильев А.В., Грин Г., Боулс Т. Исследование твердодейтериевого источника ультрахолодных нейтронов // Письма в ЖЭТФ. 1995. Т. 62. Вып. 10. С. 764–769.
5. Ахиезер А.И., Померанчук И.Я. О рассеянии нейтронов с энергией несколько градусов в жидком гелии II // ЖЭТФ. 1946. Т. 16. С. 391.
6. Серебров А.П., Фомина А.К., Харитонов А.Г., Лямкин В.А., Прудников Д.В., Иванов С.А., Ерыкалов А.Н., Онегин М.С., Митюхляев В.А., Захаров А.А., Гриднев К.А. Высокоинтенсивный источник ультрахолодных нейтронов на реакторе ВВР-М для научных исследований в области фундаментальной физики // Вестник СПбГУ. Физика и химия. 2015. Т. 2 (60). Вып. 1. С. 27–41.
7. Serebrov A.P. Supersource of ultracold neutrons at the WWR-M reactor and the program of fundamental research in physics // Crystallography Reports. 2011. Vol. 56. No. 7. Pp. 1230–1237.
8. Бондаренко С.Д. Физические свойства изотопов водорода и их соединений на линии равновесия жидкость – пар. Препринт ПИЯФ. № 2471. Гатчина: Изд. ПИЯФ, 2002. 39 с.
9. Малков М.П., Данилов И.Б., Зельдович А.Г., Фрадков А.Б. Справочник по физико-техническим основам криогеники. М.: Энергоатомиздат, 1985. 432 с.
10. Briesmeister J.F. MCNP™ – A general Monte Carlo  $N$ -particle transport code. Version 4C // Los Alamos National Laboratory. Los Alamos. New Mexico. 2000. <https://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-13709-M>.

*Статья поступила в редакцию 14.11.2018, принята к публикации 28.11.2018.*

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**СЕРЕБРОВ Анатолий Павлович** – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией физики нейтрона отделения нейтронной физики (ОНФ) НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, г. Гатчина Ленинградской области, Российская Федерация.

188300, Российская Федерация, Ленинградская область, г. Гатчина, мкр. Орлова Роща, д. 1  
serebrov\_ar@pnpi.nrcki.ru

**ЛЯМКИН Виталий Александрович** – младший научный сотрудник ОНФ НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, г. Гатчина Ленинградской области, Российская Федерация.

188300, Российская Федерация, Ленинградская область, г. Гатчина, мкр. Орлова Роща, д. 1  
lyamkin\_va@pnpi.nrcki.ru

**КОПТЮХОВ Артем Олегович** – стажер-исследователь ОНФ НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, г. Гатчина Ленинградской области, Российская Федерация.

188300, Российская Федерация, Ленинградская область, г. Гатчина, мкр. Орлова Роща, д. 1  
t44h@yandex.ru

**ОНЕГИН Михаил Сергеевич** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отделения теоретической физики (ОТФ) НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, г. Гатчина Ленинградской области, Российская Федерация.

188300, Российская Федерация, Ленинградская область, г. Гатчина, мкр. Орлова Роща, д. 1  
onegin\_ms@pnpi.nrcki.ru

**ПРУДНИКОВ Дмитрий Владимирович** – инженер-технолог ОНФ НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, г. Гатчина Ленинградской области, Российская Федерация.

188300, Российская Федерация, Ленинградская область, г. Гатчина, мкр. Орлова Роща, д. 1  
dprvbox@mail.ru

**САМОДУРОВ Олег Юрьевич** – инженер-технолог ОНФ НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, г. Гатчина Ленинградской области, Российская Федерация.

188300, Российская Федерация, Ленинградская область, г. Гатчина, мкр. Орлова Роща, д. 1  
samodurov.o@yandex.ru

## REFERENCES

- [1] I.S. Altarev, A.I. Egorov, V.F. Ezhov, et al., An investigation of the effect of the converter cooling upon the yield of ultracold neutrons and development of a cooled source of ultracold neutrons, Preprint PNPI-246, Gatchina (1976).
- [2] I.S. Altarev, Yu.V. Borisov, A.B. Brandlin, et al., A liquid hydrogen source of ultracold neutrons, Physics Letters. A. 80 (5, 6) (1980) 413–416.
- [3] I.S. Altarev, N.V. Borovikova, A.P. Bulkin, et al., Universal liquid-hydrogen source of polarized cold and ultracold neutrons at the WWR-M reactor of the Leningrad Institute of Nuclear Physics, JETP Letters. 44 (6) (1986) 344–348.
- [4] A.P. Serebrov, V.A. Mityukhlyayev, A.A. Zakharov, et al., Experimental study of solid-deuterium source of ultracold neutrons, JETP Letters. 62 (10) (1995) 785–790.
- [5] A.I. Ahizeer, I.Ya. Pomeranchuk, On elastic scattering of neutrons with energy of a few Kelvins in liquid helium II, J. Phys. USSR. 9 (1945) 461.
- [6] A.P. Serebrov, A.K. Fomin, A.G. Kharitonov, et al., High-density ultracold neutrons source for the WWR-M reactor for scientific research in fundamental physics, Bulletin of St. Petersburg University. Physics and Chemistry. 2 (60) (1) (2015) 27–41.
- [7] A.P. Serebrov, Supersource of ultracold neutrons at the WWR-M reactor and the program of fundamental research in physics, Crystallography Reports. 56 (7) (2011) 1230–1237.
- [8] S.D. Bondarenko, Properties of hydrogen isotopes and their compounds on line of vapor-liquid equilibrium. Preprint-PNPI-2471 (2002).

[9] **M.P. Malkov, I.B. Danilov, A.G. Zeldovich, et al.**, Spravochnik po fiziko-tekhnicheskim osnovam kriogeniki [Reference book on physical-technical fundamentals of cryogenics], Energoatomizdat, Moscow (1985).  
Monte Carlo  $N$ -particle transport code. Version 4C, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico. (2000) <https://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-13709-M>.

10. **J.F. Briesmeister**, MCNP6 – A general

*Received 14.11.2018, accepted 28.11.2018.*

## THE AUTHORS

### **SEREBROV Anatolii P.**

*NRC «Kurchatov Institute» – PNPI*

1, Orlova Roscha microdistrict, Gatchina, 188300, Leningrad Oblast, Russian Federation  
serebrov\_ap@pnpi.nrcki.ru

### **LYAMKIN Vitaliy A.**

*NRC «Kurchatov Institute» – PNPI*

1, Orlova Roscha microdistrict, Gatchina, 188300, Leningrad Oblast, Russian Federation  
lyamkin\_va@pnpi.nrcki.ru

### **KOPTYUHOV Artem O.**

*NRC «Kurchatov Institute» – PNPI*

1, Orlova Roscha microdistrict, Gatchina, 188300, Leningrad Oblast, Russian Federation  
t44h@yandex.ru

### **ONEGIN Mikhail S.**

*NRC «Kurchatov Institute» – PNPI*

1, Orlova Roscha microdistrict, Gatchina, 188300, Leningrad Oblast, Russian Federation  
onegin\_ms@pnpi.nrcki.ru

### **PRUDNIKOV Dmitriy V.**

*NRC «Kurchatov Institute» – PNPI*

1, Orlova Roscha microdistrict, Gatchina, 188300, Leningrad Oblast, Russian Federation  
dpybox@mail.ru

### **SAMODUROV Oleg Yu.**

*NRC «Kurchatov Institute» – PNPI*

1, Orlova Roscha microdistrict, Gatchina, 188300, Leningrad Oblast, Russian Federation  
samodurov.o@yandex.ru