

УДК 53.072; 53.004

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-538-545

## ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ИСТОЧНИКА УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ НА РЕАКТОРЕ ВВР-М

А.П. Серебров<sup>а</sup>, В.А. Лямкин<sup>а</sup>, А.О. Коптюхов<sup>а,б</sup>, М.С. Онегин<sup>а</sup>

<sup>а</sup>НИИ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, Гатчина, 188300, Российская Федерация

<sup>б</sup>Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: T44h@yandex.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию 20.03.19, принята к печати 19.04.19

Язык статьи — русский

**Ссылка для цитирования:** Серебров А.П., Лямкин В.А., Коптюхов А.О., Онегин М.С. Тепловой режим источника ультрахолодных нейтронов на реакторе ВВР-М // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 3. С. 538–545. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-538-545

### Аннотация

Представлены результаты по созданию источника ультрахолодных нейтронов в НИИ «Курчатовский институт» — ПИЯФ. Источник имеет три температурные зоны: гелиевую камеру со сверхтекучим гелием при температуре 1,3 К, дейтериевую камеру с жидким дейтерием при температуре 20 К, вакуумный корпус со свинцовым экраном и графитовыми блоками при комнатной температуре. Имеется охлаждение всех этих частей в условиях тепловой нагрузки реактора. Представлены расчеты, связанные с проектированием контуров охлаждения. Аналитически получен массовый расход воды 0,56 кг/с для охлаждения свинцового экрана при объемном тепловом потоке 27 кВт. На основании этого расхода были подобраны насос и теплообменник для автономного контура его охлаждения. При данном тепловом режиме лучистый теплоприток от носовой части вакуумного модуля к дейтериевой капсуле составил 24 Вт. Суммарный тепловой поток на дейтериевую капсулу и жидкий дейтерий с учетом реакторного излучения составил 0,3 кВт. Для поддержания фазового состояния дейтерия необходимо термостатирование в температурном диапазоне 18,73–24,12 К. Методом конечных квадратов доказана возможность безопасного поддержания фазового состояния жидкого дейтерия в капсуле объемом 60 л потоком газообразного гелия расходом 50 г/с.

### Ключевые слова

источник ультрахолодных нейтронов, реактор ВВР-М, естественная конвекция, реакторное излучение, Comsol Multiphysics

### Благодарности

Исследование выполнено в НИИ «Курчатовский институт» — ПИЯФ за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-22-00105).

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-538-545

## THERMAL MODE OF ULTRACOLD NEUTRON SOURCE AT WWR-M REACTOR

A.P. Serebrov<sup>a</sup>, V.A. Lyamkin<sup>a</sup>, A.O. Koptuykhov<sup>a,b</sup>, M.S. Onegin<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Petersburg Nuclear Physics Institute named by B.P. Konstantinov of National Research Centre “Kurchatov Institute” (NRC “Kurchatov Institute”) — PNPI, Gatchina, 188300, Russian Federation

<sup>b</sup>ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: T44h@yandex.ru

### Article info

Received 20.03.19, accepted 19.04.19

Article in Russian

**For citation:** Serebrov A.P., Lyamkin V.A., Koptuykhov A.O., Onegin M.S. Thermal mode of ultracold neutron source at WWR-M reactor. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 538–545 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-538-545

### Abstract

The paper presents the results on creation of a source of ultracold neutrons in the National Research Center “Kurchatov Institute” — PNPI. The source has three temperature zones: a helium chamber with superfluid helium at the temperature of 1.3 K, a deuterium chamber with liquid deuterium at the temperature of 20 K, a vacuum case with a lead screen and graphite blocks at room temperature. All these parts are exposed to cooling under the conditions of the reactor heat load. Calculations associated with the design of cooling circuits are presented. Analytically, a mass flow rate of 0.56 kg/s was obtained for cooling of the lead

screen with a volumetric heat flow of 27 kW. A pump and a heat exchanger were selected for an autonomous cooling circuit on the basis of this flow. At this thermal mode, the radiant heat gain from the nose part of the vacuum module to the deuterium capsule was 24 watts. The total heat flux to the deuterium capsule and liquid deuterium, taking into account the reactor radiation, was 0.3 kW. To maintain the phase state of deuterium, temperature control is required in the temperature range 18.73–24.122. The finite-square method proved the possibility of safely maintaining the phase state of liquid deuterium in a 60-liter capsule with a flow of helium gas of 50 g/s.

**Keywords**

ultracold neutron source, BWR-M reactor, natural convection, reactor radiation, Comsol Multiphysics

**Acknowledgements**

The study was carried out at the Research Center “Kurchatov Institute” — PNPI by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 14-22-00105).

**Введение**

В НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ (Гатчина) ведутся работы по созданию источника ультрахолодных нейтронов (УХН) [1–4]. Он будет располагаться в метровом канале, примыкающем к активной зоне реактора ВВР-М. Источник будет состоять из вакуумной камеры, в которой будут располагаться помещенные друг в друга камеры с жидким дейтерием и сверхтекучим гелием. В дейтерии будет осуществляться термализация реакторных нейтронов, а процесс преобразования холодных нейтронов в ультрахолодные будет осуществляться в сверхтекучем гелии [5]. Такое преобразование основано на потере энергии свободного нейтрона при возбуждении им фона в сверхтекучем гелии [6, 7]. Для поддержания фазового состояния дейтерия необходимо термостатирование в температурном диапазоне 18,73–24,12 К при тепловой нагрузке от реакторного излучения [8]. Жидкий дейтерий также используется на источнике ультрахолодных нейтронов в институте Луи-Ланжевена во Франции. Главным отличием, оказывающим наибольшее влияние на интенсивность потока ультрахолодных нейтронов является то, что источник в Гатчине находится непосредственно в активной зоне реактора ВВР-М. Такое расположение требует активного термостатирования жидкого дейтерия при объемном тепловом потоке, возникающем за счет гамма-квантов. Для снижения гамма-излучения, вносящего ощутимый вклад в долю объемного теплового потока на конструктивные элементы источника на реакторе ВВР-М, в носовой части вакуумного модуля будет располагаться свинцовый цилиндр. Согласно численному моделированию в программе MCNP, объемный тепловой поток на свинце будет составлять 21,3 кВт [9]. В 2017 году была запущена полномасштабная модель источника, включающая в себя гелиевую капсулу с вакуумной изоляцией и тепловым экраном, термостатируемым газообразным гелием. В результате была экспериментально доказана возможность получения температуры сверхтекучего гелия  $T = 1,371$  К при объемном тепловом потоке на гелиевую капсулу  $P = 60$  Вт [10]. На текущий момент в НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ создан технологический комплекс получения сверхтекучего гелия и внутриканальная часть источника УХН [11], ведутся работы по созданию контуров охлаждения. Исходя из этого, была поставлена задача выбора оптимальных параметров контуров охлаждения и необходимого оборудования для обеспечения теплового режима источника УХН. В данной публикации описаны решения задачи термостатирования дейтериевого модуля и свинцового экрана.

**Описание установки**

Источник УХН имеет модульную структуру (рис. 1).

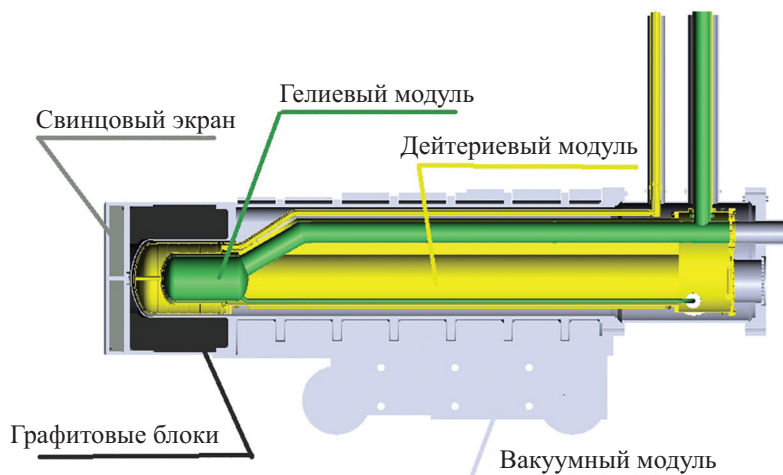


Рис. 1. Модель источника ультрахолодных нейтронов на реакторе ВВР-М

Снаружи находится вакуумный модуль с вакуумной изоляцией. Он одновременно выполняет защитную роль реактора в случае взрыва водородной смеси [4]. Внутри него находится дейтериевый модуль, состоящий из камеры с жидким дейтерием и тепловым экраном. Дейтериевая капсула имеет двойную стенку с небольшим зазором, в котором циркулирует газообразный гелий, подаваемый от рефрижератора. Тепловой экран препятствует тепловому излучению и обеспечивает охлаждение стенок нейтронотводов до момента заливки сверхтекучего гелия. После капсулы гелий идет на охлаждение теплового экрана источника и экрана криостата. Процесс конверсии холодных нейтронов в ультрахолодные осуществляется в гелиевой камере, которая находится внутри дейтериевого модуля. Процесс получения низких температур осуществляется в криостате [3]. Температура поддерживается вакуумной откачкой.

### Тепловой режим свинцового экрана

Объект термостатирования — свинцовый экран. Он имеет цилиндрическую форму диаметром  $d_{рб} = 970$  мм и толщиной  $h_{рб} = 100$  мм. Для термостатирования в двух плоскостях вырезаны змеевидные канавки. Свинцовый экран и графитовые блоки помещены в алюминиевый контейнер.

В активной зоне реактора ВВР-М могут находиться специальные свинцовые стержни. Их наличие снижает тепловыделения в конструктивных элементах источника, но понижается и плотность потока ультрахолодных нейтронов. Эксплуатация источника ультрахолодных нейтронов подразумевает два режима работы: без свинцовых блоков и со свинцовыми блоками. В зависимости от режима тепловые потоки от реакторного излучения в носовой части источника будут различаться (табл. 1).

Таблица 1. Мощность тепловых потоков в элементах конструкции носовой части вакуумного модуля источника УХН [9]

Элемент конструкции	Тепловые потоки, Вт	
	Без свинцовых блоков в активной зоне	Со свинцовыми блоками в активной зоне
Свинцовый экран	$21,3 \cdot 10^3$	$12,0 \cdot 10^3$
Алюминиевая пластина спереди свинцового экрана	2989	1810
Алюминиевая пластина за свинцовым экраном	320	230
Боковой алюминиевый цилиндр	550	350
Графитовый блок	2610	1110
Всего	27769	14500

Имеется принципиальная схема охлаждения дистиллированной водой (рис. 2).

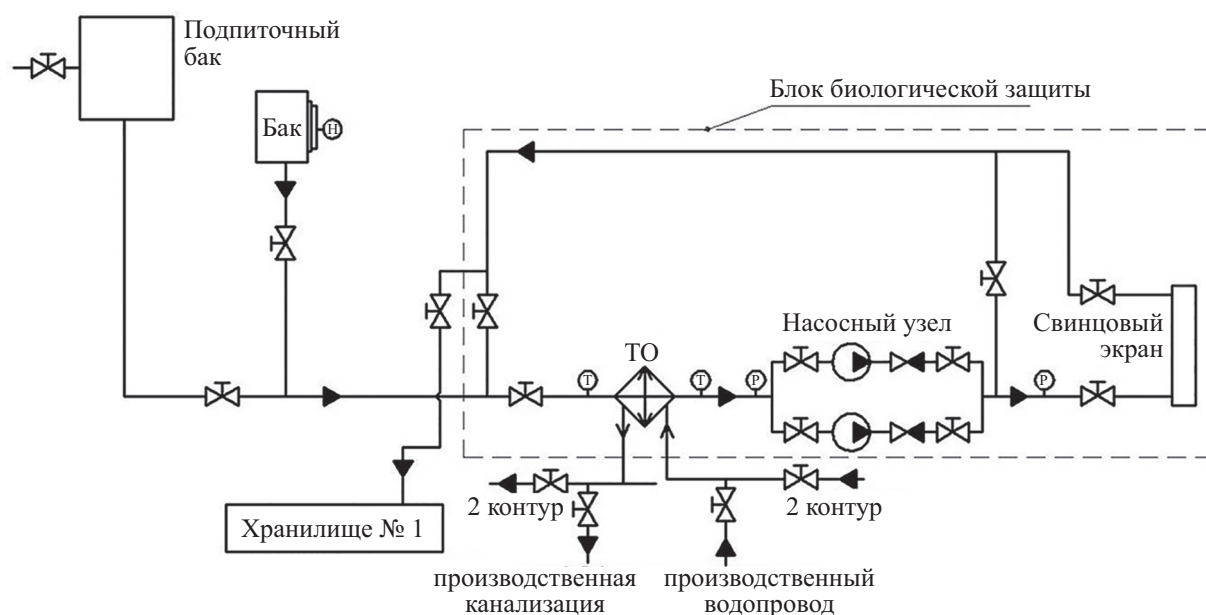


Рис. 2. Схема охлаждения свинцового экрана источника ультрахолодных нейтронов, где Н — уровнемер, Т — термометр, ТО — теплообменник, Р — манометр

Чтобы избежать фазового перехода жидкости в пар, оказывающего влияние на теплоотдачу, была выбрана температура термостатирования  $343 \pm 20$  К. Такая температура также обусловлена влиянием излучения носовой части вакуумного модуля на дейтериевую камеру и необходимостью наличия запаса времени для остановки реактора в случае отказа основного и резервного насосов.

Отвод теплоты осуществляется через теплообменник небольшой частью воды второго контура охлаждения реактора ВВР-М. Температура воды во втором контуре 298 К. Изначально будет выбрана температура воды на входе в свинцовый экран 323 К.

Исходя из этого, методом последовательных итераций был рассчитан минимальный массовый расход воды, при котором максимальная температура поверхности канала будет равна 343 К. Он получился равным 0,54 кг/с. Максимальная поверхностная температура свинцового экрана при данном расходе была найдена методом конечных элементов. Она равна 360 К (рис. 3).

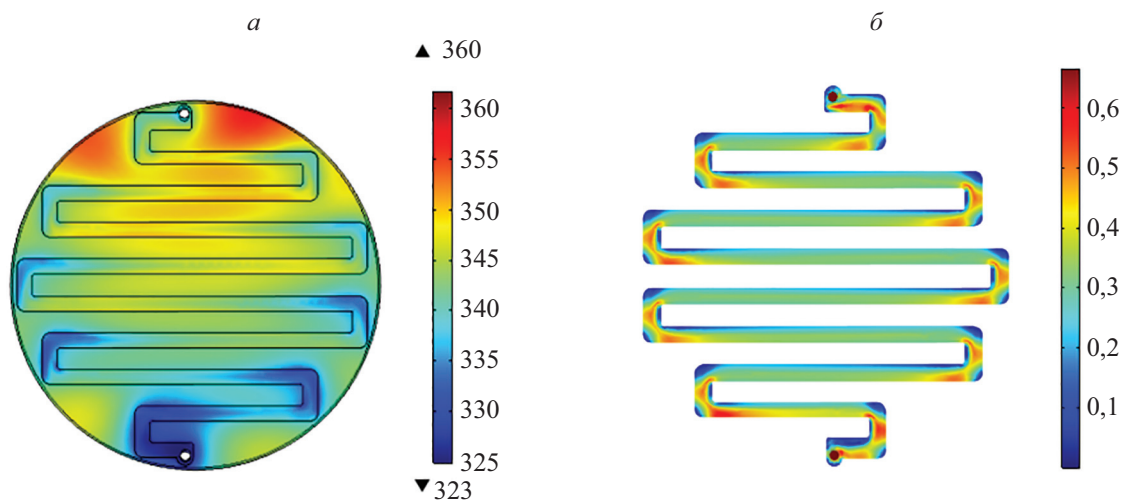


Рис. 3. Температурное поле свинцового экрана, К (а); поле скоростей теплоносителя, м/с (б)

Среднеповерхностная температура при этом равна 344 К. Для оценки влияния излучения на дейтериевую капсулу, методом конечных элементов было найдено температурное поле носовой части источника. Средняя температура излучающей поверхности оказалось равно 373 К (рис. 4). Эта температура выше средней температуры свинцового экрана, за счет образования воздушных зазоров при расширении алюминиевого контейнера. При данной температуре теплоприток к дейтериевой капсуле составит 24 Вт.

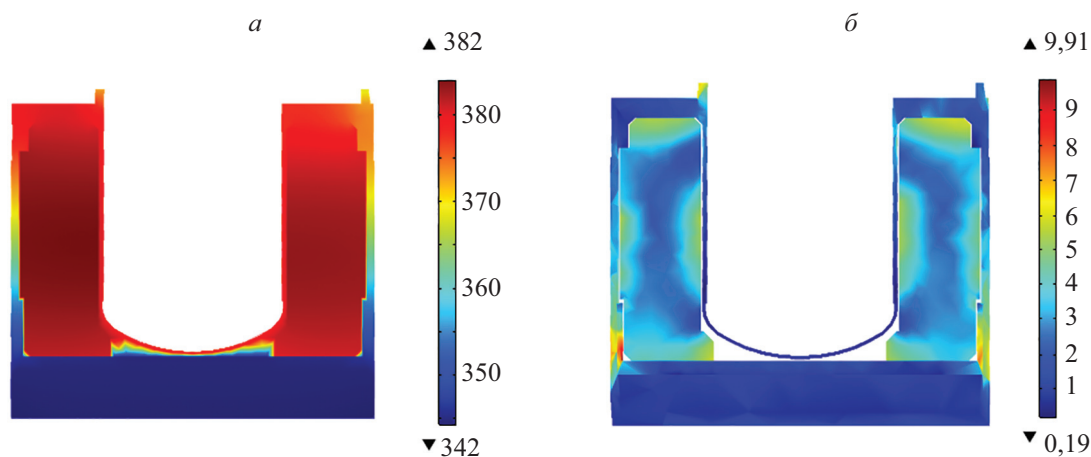


Рис. 4. Температурное поле носовой части источника ультрахолодных нейтронов, К (а); напряжение в носовой части при расширении алюминиевого корпуса и графита, МПа (б)

По приближенному коэффициенту теплоотдачи была вычислена необходимая поверхность теплообмена на  $0,5 \text{ м}^2$  для пластинчатого теплообменника. На основании данной площади был подобран теплообменник Ridan NH-04-16/1-14-TL. Поверочный расчет показал, что выбранный теплообменник способен обеспечить температуру входа в свинцовый экран 323 К с большим запасом на загрязнение.

Общее сопротивление контура охлаждения равно сумме всех сопротивлений (табл. 2). Гидравлическое сопротивление свинцового экрана найдено численно.

Таблица 2. Гидравлический расчет контура охлаждения свинцового экрана

Элемент конструкции	Гидравлическое сопротивление, Па
Свинцовый экран, суммарное	480
Трубопроводы, трение	2989
Трубопроводы, местное сопротивление	495
Трубопроводы, изменение высоты	20000
Теплообменник	14292
Вентили	800

Таким образом, общая потеря давления в трубопроводе — 0,39 атм.

Исходя из расчетных массового расхода и напора, был подобран насос Star-RS 25/8 PN 10 (табл. 3).

Таблица 3. Основные характеристики насоса Whilo Star RS 25/8

Тип	Поверхностный циркуляционный
Максимальный напор	7,8 м
Пропускная способность	5,8 куб.м/час
Потребляемая мощность	176 Вт
Номинальная мощность	37 Вт
Допустимая температура жидкости	от –263 К до 383 К
Тип ротора	«мокрый»

### Тепловой режим дейтериевого модуля

Дейтериевая капсула имеет двойную стенку с небольшим зазором, в котором циркулирует газообразный гелий (рис. 5).

Для низкотемпературной части предпочтительнее использовать последовательный контур охлаждения ввиду простоты монтажа.

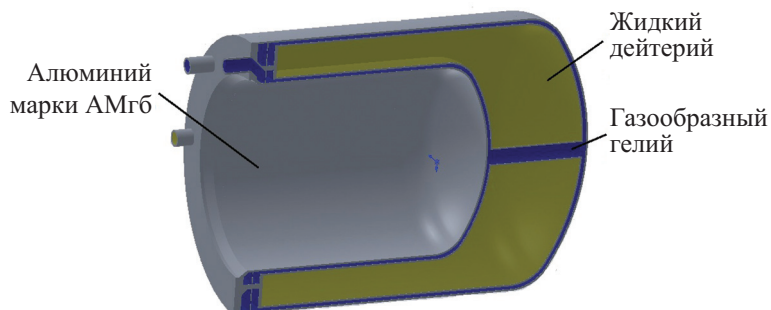


Рис. 5. Материал и содержание дейтериевой капсулы

В табл. 4 показаны тепловые потоки на конструкционные элементы от реакторного и теплового излучения и кондукции. Тепловая нагрузка на дейтериевую капсулу и тепловой экран составила суммарно 700 Вт. Энерговыведения в конструктивных элементах источника УХН получены нейтронно-физическим расчетом ядерного реактора ВВР-М с источником УХН методом Монте-Карло по программе MCNP-4C [12, 13].

Таблица 4. Тепловые потоки в дейтериевом модуле

Источник теплового потока	Тепловой поток, Вт	
	Тепловой экран	Дейтериевая капсула
Лучистый теплообмен	88	24
Кондукция (тепловые мосты)	354	2
Реакторное излучения	20	287
Итого	462	313

Важнейшим критерием безопасности источника является отсутствие возникновения локальных образований твердого дейтерия, поэтому перед дейтериевой капсулой был спроектирован нагреватель, ко-



торый будет нагревать гелий до 20 К, что позволит избежать затвердевание дейтерия при любой реакторной нагрузке без использования активных методов терморегулирования. При этом необходим будет достаточный расход, чтобы не допустить кипения дейтерия.

Предполагается, что эквивалентная теплопроводность дейтерия будет достаточно высокой, и максимальная температура будет на корпусе. Аналитически была получена расчетная зависимость максимальной температуры дейтериевой капсулы от массового расхода гелия (рис. 6). Суть метода заключается в определении температурного напора для разных массовых расходов, с учетом теплоотдачи от гелия. Расчет коэффициента теплоотдачи сводится к определению числа Нуссельта, значение которого задается критериальными уравнениями. Выше красной линии начинается процесс затвердевания дейтерия. При массовом расходе 20 г газообразного гелия в секунду максимальная температура корпуса будет ниже температуры кипения дейтерия. Был выбран расход 50 г/с. При данном расходе максимальная температура капсулы составит 22,3 К. Дальнейшее увеличение расхода не дает значительного уменьшения температуры корпуса.

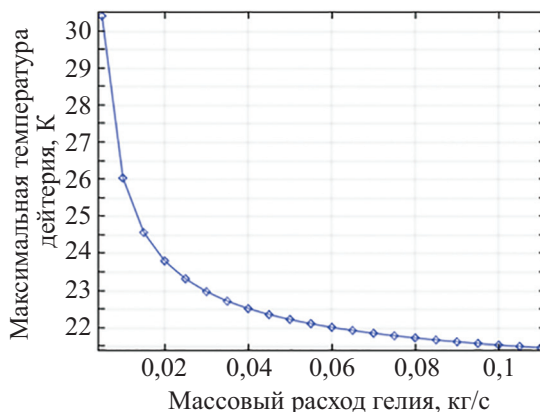


Рис. 6. Максимальная температура стенки дейтериевой капсулы

При расходе 50 г/с итоговое гидравлическое сопротивление контура охлаждения низкотемпературной части равно 76,7 кПа, оно оказалось меньше паспортного гидравлического сопротивления имеющегося рефрижератора TFC-50.

Для проверки максимальной температуры дейтерия было проведено численное моделирование [14] в программном комплексе Comsol Multiphysics с учетом математической модели, описанной ниже.

Передача теплоты теплопроводностью описывается уравнением теплопроводности для стационарного режима [15]:

$$\rho c_p \mathbf{v} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q, \quad \mathbf{q} = -k \nabla T,$$

где  $\rho$  — объемная плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $c_p$  — теплоемкости при постоянном давлении, Дж/(кг·К);  $\mathbf{v}$  — вектор скорости, м/с;  $T$  — абсолютная температура, К;  $\mathbf{q}$  — вектор теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $\nabla$  — оператор набла;  $\nabla T$  — градиент температурного поля;  $\nabla \cdot \mathbf{q}$  — скалярное умножение вектора на вектор  $\mathbf{q}$ .

За движение жидкостей отвечает уравнение Навье–Стокса, решаемое совместно с уравнением неразрывности и двумя дополнительными уравнениями для расчета кинетической энергии турбулентности и для удельной скорости диссипации кинетической энергии:

$$\rho(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = \nabla \left[ -p \mathbf{I} + (\mu + \mu_T)(\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T) - \frac{2}{3}(\mu + \mu_T)(\nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{I} - \frac{2}{3} \rho k \mathbf{I} \right] + \rho \mathbf{g};$$

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0;$$

$$\mu_T = \rho \frac{k}{\omega};$$

$$\rho(\mathbf{v} \cdot \nabla) k = \nabla \cdot [(\mu + \mu_T \sigma_k^*) \nabla k] + p_k - \beta_0^* \rho \omega k;$$

$$\rho(\mathbf{v} \cdot \nabla) \omega = \nabla \cdot [(\mu + \mu_T \sigma_\omega) \nabla \omega] + \alpha \frac{\omega}{k} p_k - \rho \beta_0 \omega^2,$$

где  $\nabla$  — оператор набла;  $\rho$  — объемная плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\mathbf{v}$  — вектор скорости, м/с;  $p$  — давление, Па;  $\mu$  — динамическая вязкость, Па·с;  $\mu_T$  — турбулентная вихревая вязкость, Па·с;  $T$  — абсолютная температура, К;  $\mathbf{g}$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $k$  — кинетическая энергия турбулентности, Дж;  $\omega$  — удельная скорость диссипации кинетической энергии, Дж/с;  $\alpha$ ,  $\sigma_k^*$ ,  $\sigma_\omega$ ,  $\beta_0$ ,  $\beta_0^*$  — параметры турбулентной модели;  $\mathbf{I}$  — единичный тензор;  $\mathbf{v} \cdot \nabla$  — скалярное умножение вектора  $\nabla$  на вектор  $\mathbf{v}$ ;  $\nabla \mathbf{v}$  — тензор скорости.

Результаты численного моделирования показали, что максимальная температура дейтерия — 21,3 К, капсулы — 22,3 К (рис. 7).

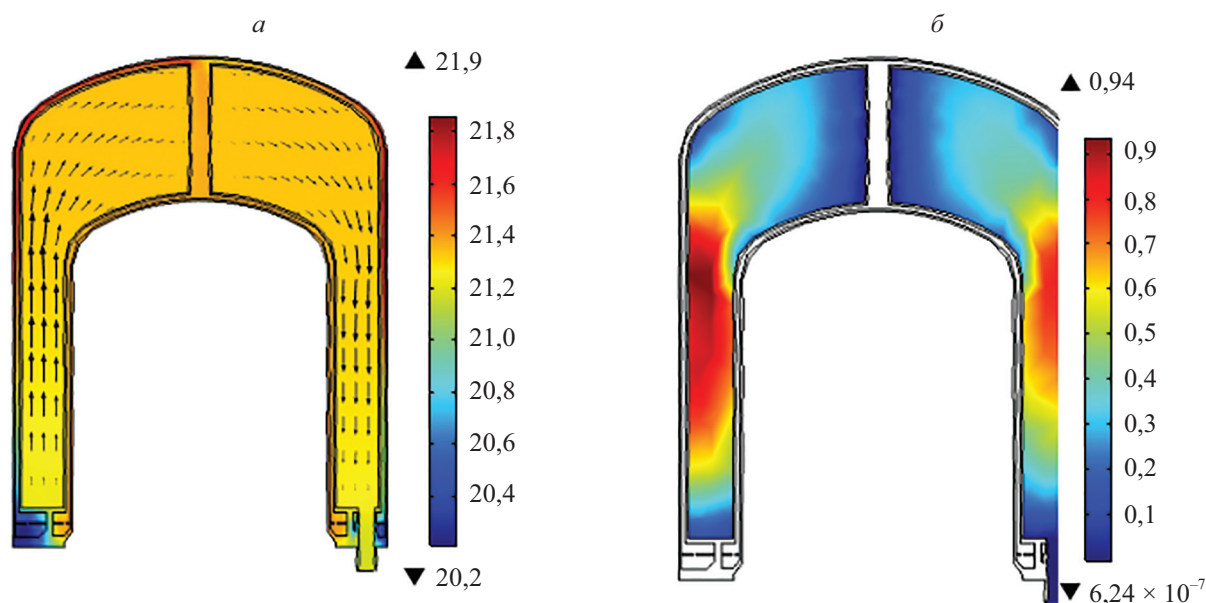


Рис. 7. Температурное поле дейтериевой капсулы, К (а); поле скоростей жидкого дейтерия при естественной конвекции, мм/с (б)

На основании расхода была спроектирована система охлаждения теплового экрана. Она представляет собой трубки условным диаметром 14 мм. Температура между трубками не превышает 30 К.

### Заключение

Были подобраны компоненты для автономного контура охлаждения свинцового экрана и обеспечен его температурный режим в температурном диапазоне 343 К. При данном тепловом режиме максимальная температура излучающей поверхности носовой части не будет превышать 373 К, а лучистый теплоприток к дейтериевой капсуле составит 24 Вт.

Для дейтериевого модуля был обеспечен тепловой режим благодаря имеющемуся рефрижератору TCF-50, для которого была подобрана последовательная схема охлаждения.

### Литература

1. Серебров А.П., Митюхляев В.А., Захаров А.А. и др. Проект источника ультрахолодных и холодных нейтронов на реакторе ВВР-М со сверхтекучем гелием в качестве замедлителя // *Физика твердого тела*. 2010. Т. 52. № 5. С. 969–973.
2. Serebrov A.P., Lyamkin V.A., Fomin A.K., Samodurov O.Yu., Kanin A.S. UCN source with superfluid helium at WWR-M reactor // *Journal of Physics Conference Series*. 2017. V. 798. P. 012147. doi: 10.1088/1742-6596/798/1/012147
3. Serebrov A.P., Kislitsin B.V., Onegin M.S., Lyamkin V.A., Prudnikov D.V., Piatovskiy V.A., Orlov S.P., Kirsanov G.A., Fomin A.K., Filchenkova D.V. The energy release and temperature field in the ultracold neutron source of the WWR-M reactor at the Peterburg Nuclear Physics Institute // *Physics of Atomic Nuclei*. 2016. V. 79. N 9-10. P. 1391–1396. doi: 10.1134/s1063778816090118
4. Serebrov A.P. Supersource of ultracold neutrons at the wwr-m reactor and the program of fundamental research in physics // *Crystallography Reports*. 2011. V. 56. N 7. P. 1230–1237. doi: 10.1134/s1063774511070303
5. Серебров А.П., Лямкин В.А., Фомин А.К., Прудников Д.В., Самодуров О.Ю., Канин А.С., Кешисhev К.О., Болдарев С.Т. Суперисточник УХН со сверхтекучим гелием на реакторе ВВР-М // *Ядерная физика и инжиниринг*. 2017. Т. 8. № 3. С. 235–241. doi: 10.1134/S207956291701016X
6. Onegin M.S., Serebrov A.P., Fomin A.K., Lyamkin V.A. Estimation of the ultracold neutron production by a source

### References

1. Serebrov A.P., Mityukhlyayev V.A., Zakharov A.A. et al. Project of the ultracold and cold neutron source at the WWR-M reactor with superfluid helium as a moderator. *Physics of the Solid State*, 2010, vol. 52, no. 5, pp. 1034–1039. doi: 10.1134/S106378341005032X
2. Serebrov A.P., Lyamkin V.A., Fomin A.K., Samodurov O.Yu., Kanin A.S. UCN source with superfluid helium at WWR-M reactor. *Journal of Physics Conference Series*, 2017, vol. 798, p. 012147. doi: 10.1088/1742-6596/798/1/012147
3. Serebrov A.P., Kislitsin B.V., Onegin M.S., Lyamkin V.A., Prudnikov D.V., Piatovskiy V.A., Orlov S.P., Kirsanov G.A., Fomin A.K., Filchenkova D.V. The energy release and temperature field in the ultracold neutron source of the WWR-M reactor at the Peterburg Nuclear Physics Institute. *Physics of Atomic Nuclei*, 2016, vol. 79, no. 9-10, pp. 1391–1396. doi: 10.1134/s1063778816090118
4. 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. doi: 10.1134/s1063774511070303
5. Serebrov A.P., Lyamkin V.A., Fomin A.K., Prudnikov D.V., Samodurov O. Yu., Kanin A.S., Keshishhev K.O., Boldarev S.T. High-density ultracold neutrons source for the WWR-M reactor. *Yadernaya Fizika i Inzhiniring*, 2017, vol. 8, no. 3, pp. 235–241. (in Russian) doi: 10.1134/S207956291701016X

- designed for the WWR-M reactor // *Technical Physics*. 2017. V. 62. N 4. P. 633–637. doi: 10.1134/s1063784217040193
7. Ахиезер А.И., Померанчук И.Я. О рассеянии нейтронов с энергией несколько градусов в жидком гелии II // *ЖЭТФ*. 1946. № 16. С. 391.
  8. Серебров А.П., Лямкин В.А., Коптюхов А.О., Онегин М.С., Прудников Д.В., Самодуров О.Ю., Иванов С.Н. Температурный расчет криогенного модуля источника УХН на реакторе ВВР-М // Сборник тезисов V Всероссийского молодежного научного форума OpenScience. Гатчина, 2018. С. 29.
  9. Серебров А.П., Кислицын Б.В., Онегин М.С. Энерговыведение и поле температур в источнике ультрахолодных нейтронов на реакторе ВВР-М ПИЯФ // *Ядерная физика и инжиниринг*. 2015. Т. 6. № 5-6. С. 297–303. doi: 10.1134/S2079562915030124
  10. Серебров А.П., Лямкин В.А., Прудников Д.В., Кешишев К.О., Болдарев С.Т., Васильев А.В. Запуск полномасштабной модели источника ультрахолодных нейтронов со сверхтекучим гелием // *Журнал технической физики*. 2017. Т. 87. № 2. С. 301–305. doi: 10.21883/JTF.2017.02.44142.1941
  11. Serebrov A.P. Program of fundamental-interaction research for the ultracold-neutron source at the the WWR-M reactor // *Physics of Atomic Nuclei*. 2018. V. 81. N 2. P. 214–221. doi: 10.1134/s1063778818020175
  12. Серебров А.П., Фомин А.К., Харитонов А.Г. и др. Высокоинтенсивный источник ультрахолодных нейтронов на реакторе ВВР-М для научных исследований в области фундаментальной физики // *Вестник СПбГУ. Физика и химия*. 2015. Т. 2. № 1. С. 27–41.
  13. Briesmeister J.F. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 4C. Los Alamos, New Mexico: Los Alamos National Laboratory, 2000.
  14. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. 392 с.
  15. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена: Учеб. Пособие для теплофизич. и теплоэнергетич. спец. вузов. М.: Высш. шк., 1990. 207 с.
  6. Onegin M.S., Serebrov A.P., Fomin A.K., Lyamkin V.A. Estimation of the ultracold neutron production by a source designed for the WWR-M reactor. *Technical Physics*, 2017, vol. 62, no. 4, pp. 633–637. doi: 10.1134/s1063784217040193
  7. Akhiezer A.I., Pomeranchuk I.Ya. On the scattering of neutrons with an energy of several degrees in liquid helium II. *Soviet Physics — JETP*, 1946, no. 16, p. 391. (in Russian)
  8. Serebrov A.P., Lyamkin V.A., Koptuyukhov A.O., Onegin M.S., Prudnikov D.V., Samodurov O.Yu., Ivanov S.N. Temperature calculation of the cryogenic module of the UCN source at the WWR-M reactor. *Proc. 5th Forum OpenScience*. Gatchina, Russia, 2018, p. 29.
  9. Serebrov A.P., Kislitsyn B.V., Onegin M.S. Energy release and temperature field in the source of ultracold neutrons at the WWR-M reactor PNPI. *Yadernaya Fizika i Inzhiniring*, 2015, vol. 6, no. 5-6, pp. 297–303. (in Russian) doi: 10.1134/S2079562915030124
  10. Serebrov A.P., Lyamkin V.A., Prudnikov D.V., Vasil'ev A.V., Keshishev K.O., Boldarev S.T. Putting in operation a full-scale ultracold-neutron source model with superfluid helium. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2017, vol. 62, no. 2, pp. 329–333. doi: 10.1134/S1063784217020256
  11. Serebrov A.P. Program of fundamental-interaction research for the ultracold-neutron source at the the WWR-M reactor. *Physics of Atomic Nuclei*, 2018, vol. 81, no. 2, pp. 214–221. doi: 10.1134/s1063778818020175
  12. Serebrov A.P., Fomin A.K., Kharitonov A.G. et al. High-density ultracold neutrons source for the WWR-M reactor for scientific research in fundamental physics. *Vestnik of St. Petersburg State University, Physics, Chemistry*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 27–41. (in Russian)
  13. Briesmeister J.F. MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 4C. Los Alamos, New Mexico: Los Alamos National Laboratory, 2000.
  14. Segerlind L.J. *Applied Finite Element Analysis*. Wiley, 1976.
  15. Dul'nev G.N., Parfenov V.G., Sigalov A.V. *Using of electronic computer for solving heat exchange problems*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1990, 207 p. (in Russian)

## Авторы

**Серебров Анатолий Павлович** — доктор физико-математических наук, член-корреспондент Академии наук, главный научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, Гатчина, 188300, Российская Федерация, Scopus ID: 7007178247, ORCID ID: 0000-0002-6734-038X, serebrov\_ap@pnpi.nrcki.ru

**Лямкин Виталий Александрович** — кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, Гатчина, 188300, Российская Федерация, Scopus ID: 56035040100, ORCID ID: 0000-0002-0640-9507, lyamkin\_va@pnpi.nrcki.ru

**Коптюхов Артём Олегович** — инженер-технолог, НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, Гатчина, 188300, Российская Федерация; студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-9660-3601, T44h@yandex.ru

**Онегин Михаил Сергеевич** — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, Гатчина, 188300, Российская Федерация, Scopus ID: 6603056317, ORCID ID: 0000-0003-1669-2876, onegin\_ms@pnpi.nrcki.ru

## Authors

**Anatoli P. Serebrov** — D.Sc., Corresponding member of Academy of Sciences, Chief scientific researcher, Petersburg Nuclear Physics Institute named by B.P. Konstantinov of National Research Centre “Kurchatov Institute” (NRC “Kurchatov Institute” - PNPI), Gatchina, 188300, Russian Federation, Scopus ID: 7007178247, ORCID ID: 0000-0002-6734-038X, serebrov\_ap@pnpi.nrcki.ru

**Vitaly A. Lyamkin** — PhD, Junior scientific researcher, Petersburg Nuclear Physics Institute named by B.P. Konstantinov of National Research Centre “Kurchatov Institute” (NRC “Kurchatov Institute” — PNPI), Gatchina, 188300, Russian Federation, Scopus ID: 56035040100, ORCID ID: 0000-0002-0640-9507, lyamkin\_va@pnpi.nrcki.ru

**Artem O. Koptuyukhov** — Process engineer, Petersburg Nuclear Physics Institute named by B.P. Konstantinov of National Research Centre “Kurchatov Institute” (NRC “Kurchatov Institute” - PNPI), Gatchina, 188300, Russian Federation; student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-9660-3601, T44h@yandex.ru

**Mikhail S. Onegin** — PhD, Senior scientific researcher, Petersburg Nuclear Physics Institute named by B.P. Konstantinov of National Research Centre “Kurchatov Institute” (NRC “Kurchatov Institute” — PNPI), Gatchina, 188300, Russian Federation, Scopus ID: 6603056317, ORCID ID: 0000-0003-1669-2876, onegin\_ms@pnpi.nrcki.ru