

УДК 53.072; 53.004

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-263-271

## ТЕПЛООБМЕННИК ДЛЯ УСТРОЙСТВА ТЕРМАЛИЗАЦИИ НЕЙТРОНОВ НА ПУЧКОВОМ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ КОРПУСНОМ РЕАКТОРЕ

А.П. Серебров<sup>a</sup>, В.А. Лямкин<sup>a</sup>, А.О. Коптюхов<sup>a,b</sup>, М.С. Онегин<sup>a</sup>, А.Н. Коваленко<sup>c,b</sup>

<sup>a</sup> НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, 188300, Российская Федерация

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

<sup>c</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

Адрес для переписки: T44h@yandex.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию 14.01.20, принята к печати 25.02.20

Язык статьи — русский

**Ссылка для цитирования:** Серебров А.П., Лямкин В.А., Коптюхов А.О., Онегин М.С., Коваленко А.Н. Теплообменник для устройства термализации нейтронов на пучковом исследовательском корпусном реакторе // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 2. С. 263–271. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-263-271

### Аннотация

Для фундаментальных исследований на пучковом исследовательском корпусном реакторе проектируется установка термализации нейтронов — «источник ультрахолодных нейтронов». Для экспериментов нового поколения в областях физики слабых взаимодействий и астрофизики необходима статистическая точность, связанная с высокой плотностью ультрахолодных нейтронов. Для достижения высокой плотности гелий-4 в камере источника, который используется в качестве конвертора холодных нейтронов в ультрахолодные, должен находиться при температуре порядка 1 К. При использовании вакуумной откачки паров гелия-4 в источниках ультрахолодных нейтронов еще не удалось получить температуру ниже 1,4 К. Для достижения более низких температур необходимо давление насыщенных паров должно составлять менее 50 Па, что невозможно ввиду гидравлических потерь. Предполагается использование теплообменника, в котором гелий-4 будет охлаждаться гелием-3. Это обосновано тем, что температуру гелия-3 эффективнее поддерживать вакуумной откачкой, так как давление его насыщенных паров на порядок выше, чем у гелия-4. Между двумя гелиями будет создаваться температурный напор за счет температурного скачка, описанного П.Л. Капицей, и теплового моста между капсулой с гелием и теплообменником. Для решения данной проблемы предложена оптимизация с использованием численного моделирования на основании математической модели тепловых процессов в камере со сверхтекучим гелием, учитывающая контактное тепловое сопротивление, описываемое моделью акустического рассогласования И.М. Халатникова с поправочным коэффициентом. Представлен пример такой оптимизации для источника ультрахолодных нейтронов, находящегося в Гатчине. Математическая модель реализована в универсальном решателе на основе метода конечных элементов. Предложены геометрические параметры теплообменника, в котором температурный напор составил 0,2 К, температура гелия-4 достигается вакуумной откачкой паров гелия-3 при давлении 850 Па. Снижение температуры с 1,4 до 1 К повысит плотность ультрахолодных нейтронов почти на порядок величины, что увеличит статистическую точность проводимых на пучковом исследовательском реакторе экспериментов с ультрахолодными нейтронами.

### Ключевые слова

ультрахолодные нейтроны, источник ультрахолодных нейтронов, сверхтекучий гелий, двухжидкостная модель, реактор ПИК

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-263-271

## HEAT EXCHANGER FOR NEUTRON THERMALIZATION DEVICE IN BEAM RESEARCH VESSEL REACTOR

A.P. Serebrov<sup>a</sup>, V.A. Lyamkin<sup>a</sup>, A.O. Koptyukhov<sup>a,b</sup>, M.S. Onegin<sup>a</sup>, A.N. Kovalenko<sup>c,b</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

<sup>c</sup> Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

Corresponding author: T44h@yandex.ru

### Article info

Received 14.01.20, accepted 25.02.20

Article in Russian

**For citation:** Serebrov A.P., Lyamkin V.A., Koptyukhov A.O., Onegin M.S., Kovalenko A.N. Heat exchanger for neutron thermalization device in beam research vessel reactor. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 263–271 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-2-263-271

### Abstract

The paper presents a neutron thermalization unit, “a source of ultracold neutrons”, designed for basic research in a beam research hull reactor. For new-generation experiments in the fields of weak-interaction physics and astrophysics, statistical accuracy associated with high density of ultracold neutrons is necessary. To achieve high density for helium-4 in the source chamber, which is used as a converter of cold neutrons into the ultracold ones, it should be at the temperature of about 1 K. In case of applying vacuum pumping of helium-4 vapors in ultracold neutron sources, it has not yet succeeded to obtain a temperature below 1.4 K. To achieve lower temperatures, the required saturated vapor pressure should be less than 50 Pa, which is impossible due to hydraulic losses. It is proposed to use a heat exchanger where helium-4 will be cooled by helium-3. The reason is that the temperature of helium-3 is more efficiently maintained by vacuum pumping since its saturated vapor pressure is an order of magnitude higher than that of helium-4. However, between two heliums the temperature drop occurs due to Kapitza jump and thermal bridge between the helium capsule and heat exchanger. To solve this problem, we proposed optimization using numerical simulation on the basis of a mathematical model of thermal processes in a chamber with superfluid helium. The model takes into account the contact thermal resistance of Khalatnikov acoustic mismatch model with a correction coefficient. An example of such optimization is presented for the ultracold neutron source located in Gatchina. The mathematical model was implemented in the general solver based on the finite element method. A heat exchanger design geometry was proposed with the temperature drop equal to 0.2 K; the temperature of helium-4 was achieved by vacuum pumping of helium-3 vapors at the pressure of 850 Pa. The temperature fall from 1.4 K to 1 K will increase the density of ultracold neutrons by almost an order of magnitude, and increase statistical accuracy of experiments with ultracold neutrons carried out in a non-beam research reactor.

### Keywords

ultracold neutrons, ultracold neutron source, superfluid helium, two-fluid model, beam research vessel reactor

### Введение

В структурном подразделении НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ в Гатчине проходит многоэтапная программа подготовки к физическому пуску реактора ПИК [1]. Вывод реактора на проектную мощность 100 МВт ожидается к концу 2021 года. Реактор предназначен для фундаментальных и прикладных научных исследований на экспериментальных установках, расположенных в экспериментальных каналах вблизи активной зоны и на выведенных нейтронных пучках [2]. Расположение экспериментальных каналов вблизи активной зоны реактора показано на рис. 1. В исследовательских установках используются нейтроны, образованные в результате цепной ядерной реакции. В настоящее время идет подготовка приборной базы. До 2025 г. планируется ввести в эксплуатацию 40 исследовательских установок на реакторе ПИК.

Семь установок будут предназначены для проведения фундаментальных исследований с ультрахолодными нейтронами, полученными замедлением реакторных нейтронов до низких энергий порядка  $10^{-7}$  эВ. Ультрахолодные нейтроны обладают свойством отражаться от поверхности материалов, оптический потенциал которых больше кинетической энергии нейтрона. Это позволяет проводить эксперименты с удержанием ультрахолодных нейтронов в вакуумных сосудах до времени жизни, ограниченного  $\beta$ -распадом.

Такие эксперименты проводятся с целью поиска «Новой физики» [3], например, определения теоретически предсказанного электрического дипольного момента нейтрона [4, 5], значение которого помогло бы объяснить преобладание материи над антиматерией во вселенной [6]. Кроме того, важным для подтверждения Стандартной Модели является время жизни свободного нейтрона [7–10], измеряемого при хранении ультрахолодных нейтронов в материальных и магнитных ловушках [11, 12]. Ультрахолодные нейтроны также используются для изучения антисимметрии  $\beta$ -распада [13, 14] и наблюдения осцилляций нейтрона в антинейтрон и зеркальный нейтрон [15, 16].

Для извлечения нейтронов с очень низкой энергией для проведения экспериментов проектируется устрой-

ство для проведения экспериментов проектируется устрой-

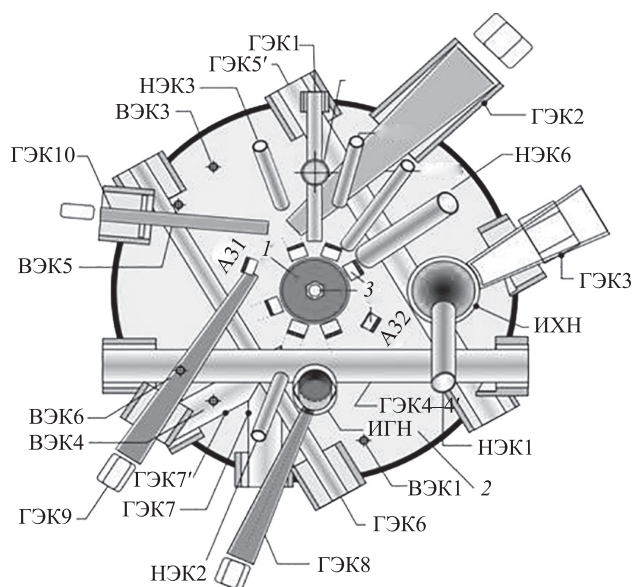


Рис. 1. Расположение каналов в тяжеловодном отражателе реактора ПИК для вывода нейтронов к экспериментальным установкам: 1 — активная зона; 2 — тяжеловодный отражатель; 3 — поглощающие шторки и стержни; ВЭК — вертикальные экспериментальные каналы; НЭК — наклонные экспериментальные каналы; ГЭК — горизонтальные экспериментальные каналы; ИХН — источник холодных нейтронов (замедлитель — жидкий дейтерий); ИГН — источник горячих нейтронов (замедлитель — графит); АЗ — стержни аварийной защиты

ство термализации нейтронов: «источник ультрахолодных нейтронов» в горизонтальном экспериментальном канале ГЭК-4. Источник включает в себя камеру с жидким дейтерием объемом 60 л, чтобы замедлить поток тепловых нейтронов, и камеру со сверхтекучим гелием объемом 35 л, куда поступают предварительно замедленные нейтроны. Расположение камер показано на рис. 2. В сверхтекучем гелии происходит возбуждение фононов, при котором нейтроны теряют энергию до  $10^{-7}$  эВ [17]. Такие нейтроны могут транспортироваться в исследовательские установки и находиться в них длительное время около 15 минут, пока не произойдет  $\beta$ -распад. Спектр получаемых нейтронов показан на рис. 3.

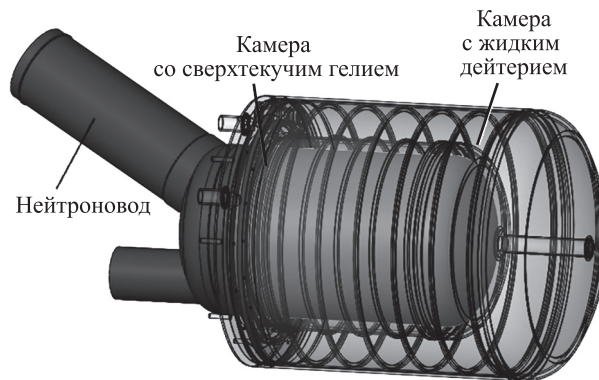


Рис. 2. Конструкция источника ультрахолодных нейтронов на реакторе ПИК

Основным недостатком этих экспериментов является недостаточная статистическая точность, из-за чего время эксперимента увеличивается. Значительное увеличение плотности нейтронов позволит улучшить статистическую точность. Для этого по всему миру ведутся работы по созданию высокопоточных устройств термализации нейтронов, в которых плотность ультрахолодных нейтронов увеличивается за счет использования нового принципа — рассеяния нейтронов до очень низких энергий при фоновом возбуждении в сверхтекучем гелии. Получаемая плотность при этом зависит от температуры гелия (рис. 4). Для того чтобы достигнуть наибольшей плотности ультрахолодных нейтронов, гелий-4 в камере должен иметь температуру порядка 1 К. Поддержание вакуумной откачкой такой температуры у гелия-4 возможно только при давлении порядка 50 Па без тепловых нагрузок, что требует дорогостоящего оборудования. По этой причине отвод радиационной теплоты от камеры со сверхтекучим гелием-4 выгоднее осуществлять гелием-3 через теплообменник. Давление его насыщенных паров при 1 К — 1159 Па [18]. Эскизный проект теплообменника показан на рис. 5.

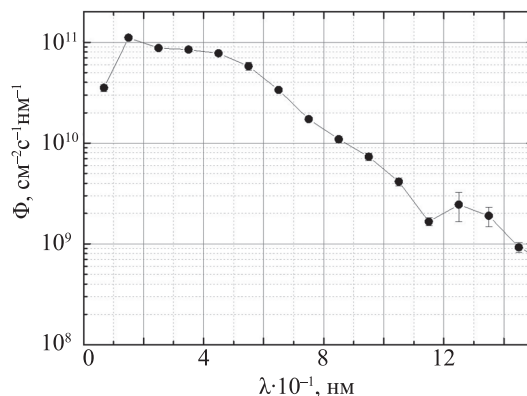
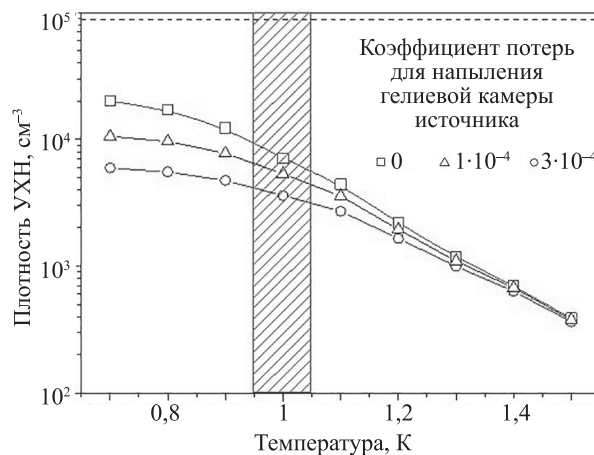


Рис. 3. Расчетный спектр нейтронов, получаемых в источнике ультрахолодных нейтронов на реакторе ПИК

### Задачи и методы исследования

Увеличение плотности ультрахолодных нейтронов на порядок по сравнению с предыдущими поколениями установок термализации нейтронов достигается, когда температура гелия-4 в капсуле источника поддерживается на уровне  $T_{He4,k} = 1$  К при тепловых нагрузках, указанных в таблице.



При этом температура поступающего в теплообменник гелия-3 от проектируемого криостата ожидается на уровне  $T_{He3,TO} = 0,8$  К. Гелий-3 охлаждается в криостате с применением эффекта дросселирования и поддер-

Рис. 4. Плотность ультрахолодных нейтронов в закрытой камере источника в зависимости от температуры гелия в камере источника

Таблица. Тепловыделения в гелиевой камере, Вт

Объемный тепловой поток в алюминиевой капсуле за счет $\beta$ -излучения	0,26
Объемный тепловой поток в алюминиевой капсуле за счет $\gamma$ -нейтронного излучения	0,48
Объемный тепловой поток в сверхтекучем гелии за счет $\gamma$ -нейтронного излучения	0,96
Лучистый тепловой поток от дейтериевой капсулы	0,01
Кондуктивный тепловой поток по тепловому мосту от дейтериевой капсулы	0,15
Суммарный тепловой поток в капсуле	1,86

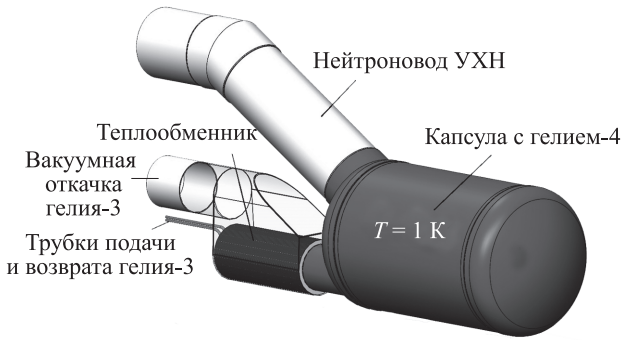


Рис. 5. Эскизный проект теплообменника в источнике ультрахолодных нейтронов на пучковом исследовательском корпусном реакторе

живается на заданной температуре вакуумной откачкой. Примерные размеры камеры источника: длина — 0,5 м; диаметр — 0,3 м.

Объемные тепловые потоки возникают при включении реактора на проектную мощность 100 МВт. Включение реактора осуществляется после захлаживания гелия в капсуле. Между гелием-4 в капсуле и гелием-3 в теплообменнике возникает тепловой напор за счет теплового моста и термического сопротивления теплообменника. Тепловым мостом является труба диаметром 0,1 м и длиной 0,15 м между теплообменником и капсулой. Наличие теплового моста необходимо для установки защиты из кадмия, предотвращающей рассеивание нейтронов на гелии-3. Термическое сопротивление, вызванное отражением фоонов, было экспериментально обнаружено П.Л. Капицей [19], и описывается различными теориями. Проектные температуры  $T_{\text{He4,к}}$ ,  $T_{\text{He3,ТО}}$  связаны соотношением:

$$T_{\text{He4,к}} = T_{\text{He3,ТО}} + \Delta T_{\text{ТО}} + \Delta T_{\text{ТМ}},$$

где  $\Delta T_{\text{ТО}}$  — тепловой напор на стенках теплообменника, К;  $\Delta T_{\text{ТМ}}$  — перепад температур за счет теплового моста, К.

Для обеспечения заданного теплового режима необходимо спроектировать теплообменник с площадью теплообмена, обеспечивающей минимальный тепловой напор  $\Delta T_{\text{ТО}}$ , при котором  $T_{\text{He4,к}}$  не превысит проектного уровня 1 К. Для этого необходимо точно определить  $\Delta T_{\text{ТМ}}$ , для чего необходимо производить численное моделирование тепловых процессов в гелиевой капсуле.

### Численное моделирование процессов теплообмена в гелиевой капсуле

Естественную конвекцию в сверхтекучем гелии можно описать с помощью двухжидкостной модели Ландау–Халатникова [20]. Для термодинамического состояния и трехмерного потока нормальных и сверхтекучих компонентов в гелии-4 использовались следующие уравнения частных производных [21, 22]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\rho_n \mathbf{v}_n + \rho_s \mathbf{v}_s}{\rho} \nabla p + \rho_n c^2 \nabla \mathbf{v}_n + \varphi w^2 \frac{\rho_s \rho_n}{\rho} \nabla \mathbf{v}_n + \\ & + \varphi T \rho_s s \nabla \mathbf{v}_n + \rho_s c^2 \nabla \mathbf{v}_s - \varphi w^2 \frac{\rho_s \rho_n}{\rho} \nabla \mathbf{v}_s - \varphi T \rho_s s \nabla \mathbf{v}_s = \\ & - \varphi T \rho_s s \nabla \mathbf{v}_s - \nabla(\varphi k \nabla T) - \varphi A \rho_s \rho_n w^2 \mathbf{w} \mathbf{v}_n + \varphi A \rho_s \rho_n w^2 \mathbf{w} \mathbf{v}_s = \\ & = \varphi q - \varphi \tau \nabla \mathbf{v}_n - \rho c^2 \mathbf{v}_n \nabla \frac{\rho_n}{\rho} - \rho c^2 \mathbf{v}_s \nabla \frac{\rho_s}{\rho} - \varphi T \mathbf{w} \nabla \rho_s s - \\ & - \varphi w^2 \mathbf{w} \nabla \frac{\rho_s \rho_n}{2\rho}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \rho_n \frac{\partial \mathbf{v}_n}{\partial t} + \frac{\rho_n}{\rho} \nabla p + \rho_n \mathbf{v}_n \nabla \mathbf{v}_n + \frac{\rho_s \rho_n}{\rho} \mathbf{w} \nabla \mathbf{v}_n - \frac{\rho_s \rho_n}{\rho} \mathbf{w} \nabla \mathbf{v}_s + \\ & + \rho_s s \nabla T + A \rho_s \rho_n w^2 \mathbf{v}_n - A \rho_s \rho_n w^2 \mathbf{v}_s = -\nabla \tau + \rho_n \mathbf{g}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \rho_s \frac{\partial \mathbf{v}_s}{\partial t} + \frac{\rho_s}{\rho} \nabla p - \frac{\rho_s \rho_n}{\rho} \mathbf{w} \nabla \mathbf{v}_n + \rho_s \mathbf{v}_s \nabla \mathbf{v}_s + \frac{\rho_s \rho_n}{\rho} \mathbf{w} \nabla \mathbf{v}_s - \\ & - \rho_s s \nabla T - A \rho_s \rho_n w^2 \mathbf{v}_n + A \rho_s \rho_n w^2 \mathbf{v}_s = \rho_s \mathbf{g}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_n \varphi C_v T \nabla \mathbf{v}_n + w^2 \frac{\rho_s \rho_n}{\rho} \nabla \mathbf{v}_n + T \rho_s s \nabla \mathbf{v}_n + \\ & + \rho_s \varphi C_v T \nabla \mathbf{v}_s - w^2 \frac{\rho_s \rho_n}{\rho} \nabla \mathbf{v}_s - T \rho_s s \nabla \mathbf{v}_s + \\ & + \rho C_v \frac{\rho_n \mathbf{v}_n + \rho_s \mathbf{v}_s}{\rho} \nabla T - \nabla(k \nabla T) - A \rho_s \rho_n w^2 \mathbf{w} \mathbf{v}_n + \\ & + \varphi A \rho_s \rho_n w^2 \mathbf{w} \mathbf{v}_s = q - \tau \nabla \mathbf{v} - \rho \varphi C_v T \mathbf{v}_n \nabla \frac{\rho_n}{\rho} - \\ & - \rho \varphi C_v T \mathbf{v}_s \nabla \frac{\rho_s}{\rho} - T \mathbf{w} \nabla \rho_s s - w^2 \mathbf{w} \nabla \frac{\rho_s \rho_n}{\rho}, \end{aligned}$$

где  $\varphi$  — коэффициент Грюнайзена;  $\rho$  — массовая плотность гелия;  $\rho_n$  — плотность нормальной компоненты;  $\rho_s$  — плотность сверхтекучей компоненты;  $\tau$  — тензор напряжений;  $C_p$  — теплоемкость при постоянном давлении;  $\mathbf{g}$  — вектор гравитации;  $q$  — тепловой поток;  $T$  — температура;  $\mathbf{v}_n$  — вектор скорости нормальной компоненты;  $\mathbf{v}_s$  — вектор скорости сверхтекучей компоненты;  $\mathbf{w}$  — сумма векторов скорости;  $k$  — коэффициент теплопроводности;  $w$  — разность скоростей нормальной и сверхтекучей компонент;  $p$  — давление;  $t$  — время;  $c$  — скорость первого звука в жидком гелии;  $\nabla$  — оператор Набла;  $A$  — дискретная версия матрицы уравнений в частных производных;  $C_v$  — удельная теплоемкость при постоянной плотности.

Уравнения были реализованы в программе COMSOL MULTIPHYSICS на основе метода конечных элементов. В результате численного моделирования были получены поля скорости и температуры гелия в различные моменты времени. Вычисления производились при разных температурах гелия-4 в теплообменнике. На рис. 6 представлены максимальные температуры в гелиевой капсуле при температуре гелия у стенок теплообменника 0,92 К.

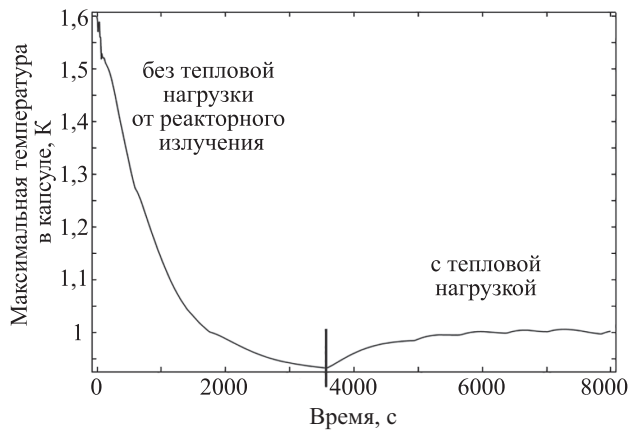


Рис. 6. Выход температуры гелия в капсуле на стационар

Из графика на рис. 6 видно, что при данной температуре гелия-4 в теплообменнике в капсуле она составит 1 К. При этом время охлаждения составляет 32 мин. Без тепловой нагрузки от реактора гелий в капсуле можно охладить до температуры 0,96 К за 40 мин.

На рис. 7 показано распределение температур и поле скоростей гелия в стационарном тепловом режиме.

До 100 с наблюдается неустановившийся режим с вихревым течением, температурные поля и скорости в различные моменты времени показаны на рис. 8.

### Выбор основных параметров теплообменника

При низких температурах передача теплоты на границах контакта двух тел происходит с термическим контактным сопротивлением. Это связано с тем, что фононы более нагретого твердого тела практически полностью отражаются от границы. Скачок температур, вызванный фононным сопротивлением, был экс-

периментально обнаружен П.Л. Капицей. Его можно вычислить из уравнения:

$$\Delta T_{\text{ТО}} = \frac{R_{\text{к}} Q}{A},$$

где  $\Delta T$  — разность температур по границе;  $A$  — площадь контактной поверхности;  $Q$  — тепловой поток через границу;  $R_{\text{к}}$  — термическое сопротивление на границе.

$\Delta T_{\text{ТО}}$  уменьшается при увеличении площади контактной поверхности  $A$ . В источнике ультрахолодных нейтронов на пучковом исследовательском корпусном реакторе оребрение возможно только поверхности контакта He3-Cu. Точность обработки меди позволит изготовить ребра нужной высоты  $x$  (рис. 9), толщиной 1 мм и шагом 2 мм. Увеличение площади теплообмена через поверхность He4-Cu происходит только с увеличением длины теплообменника  $l$ , так как оребрение этой поверхности значительно увеличит потери ультрахолодных нейтронов при их рассеянии на ребристой поверхности.

$R_{\text{к}}$  зависит от температуры  $T$  пропорционально  $T^{-3}$  и описывается моделью акустического рассогласования Халатникова. Эта модель предсказывает, что для границы He3-Cu  $AR_{\text{к}}T^3 = 0,1 \text{ м}^2\text{К}^4/\text{Вт}$ , для границы He4-Cu  $AR_{\text{к}}T^3 = 0,05 \text{ м}^2\text{К}^4/\text{Вт}$  [23]. Однако теория плохо согласуется с экспериментально полученными данными при температурах больше 100 мК [23]. Для температурного диапазона вблизи 1 К экспериментальное тепловое сопротивление на порядок ниже величины прогноза. Согласно экспериментальным данным на границе He3-Cu  $AR_{\text{к}}T^3 = 0,0033 \text{ м}^2\text{К}^4/\text{Вт}$ , для границы He4-Cu  $AR_{\text{к}}T^3 = 0,0017 \text{ м}^2\text{К}^4/\text{Вт}$ .

В зависимости от длины теплообменника  $l$  и высоты ребра  $x$  аналитически получена температура гелия-4 в теплообменнике при температуре гелия-3, равной 0,8 К (рис. 10). Нужная температура гелия-4, равная 0,92 К, показана черной изотермой. Была выбрана высота ребра  $x = 0,01 \text{ м}$ , длина теплообменника  $y = 0,22 \text{ м}$ , с запасом — 0,35 м.

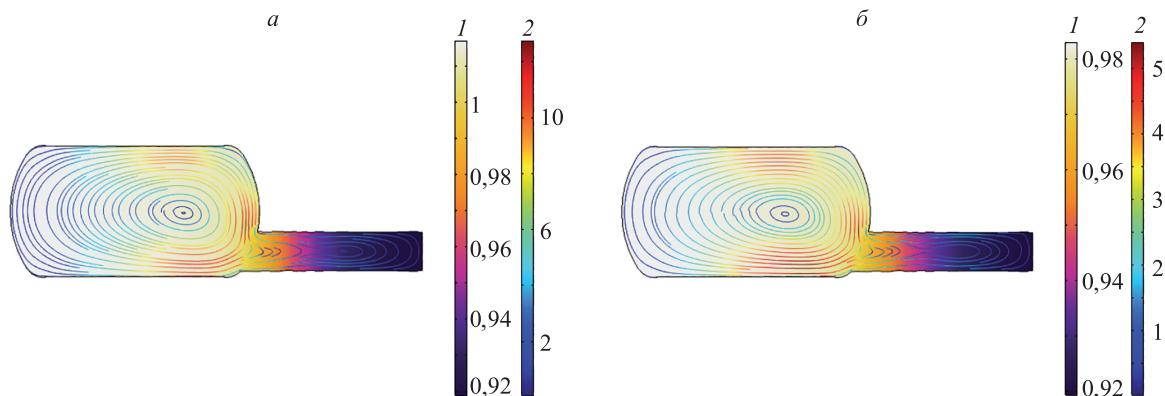


Рис. 7. Распределение температур и скорость по линиям тока гелия в капсуле от реакторного излучения: с тепловой нагрузкой (а); без тепловой нагрузки (б).

1 — температура, К; 2 — скорость, мм/с

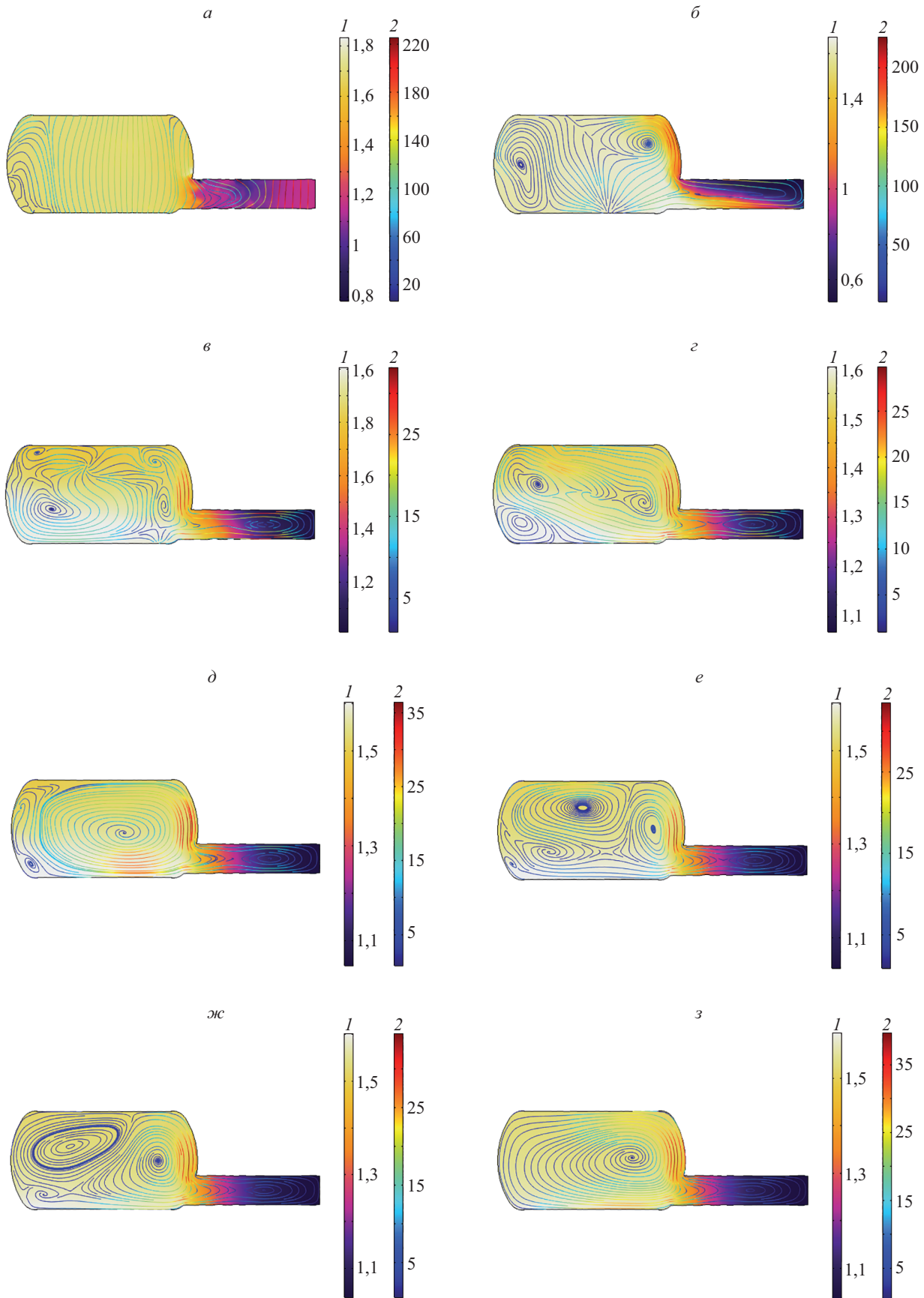


Рис. 8. Распределение температур и скорость по линиям тока гелия в различные моменты времени:  $t = 20$  с (а);  $t = 30$  с (б);  $t = 40$  с (в);  $t = 50$  с (г);  $t = 60$  с (д);  $t = 70$  с (е);  $t = 80$  с (ж);  $t = 100$  с (з).

1 — температура, К; 2 — скорость, мм/с

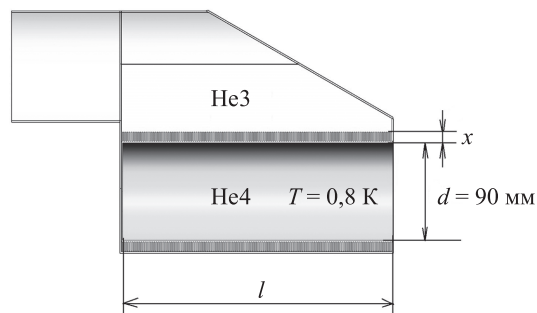


Рис. 9. Теплообменник гелиевого модуля в разрезе:  $d$  — диаметр теплообменника;  $l$  — длина теплообменника

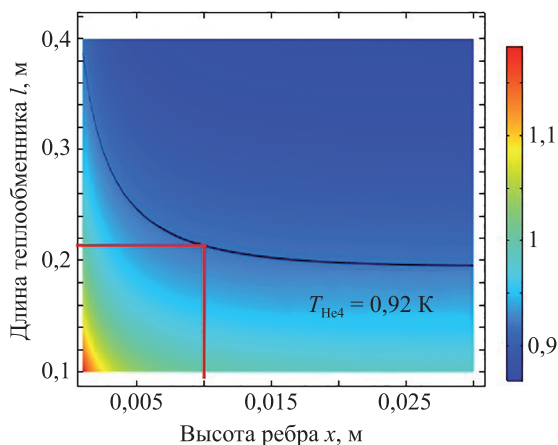


Рис. 10. Температура гелия-4 в теплообменнике

## Заключение

Для термостатирования гелия-4 на температурном уровне 1 К в условиях реакторных тепловых нагрузок можно использовать теплообменник, в котором радиационное тепло от жидкого гелия-4 будет отводиться жидким гелием-3. Температуру гелия-3 можно поддерживать вакуумной откачкой при давлении 850 Па, что значительно уменьшает стоимость насосного оборудования. При передаче на таком температурном уровне необходимо учитывать контактное термическое сопротивление, обусловленного наличием температурного скачка, описанного П.Л. Капицей. Также гелий-3 имеет большое сечение захвата нейтронов, и поэтому теплообменник необходимо отдалять от капсулы на расстояние 0,15 м, что является тепловым мостом. В разделе «Выбор основных параметров теплообменника» были предложены геометрические параметры теплообменника, в котором по результатам численного моделирования ожидается перепад температур 120 мК за счет термического контактного сопротивления и 80 мК за счет теплового моста.

## Литература

1. Ковальчук М.В., Аксенов В.Л., Драгунов Ю.Г. и др. Физический пуск реактора ПИК. Планы по подготовке энергетического пуска: сборник докладов международной научно-технической конференции «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики». М., 2012. С. 42.
2. Серебров А.П., Васильев А.В., Варламов В.Е. и др. Реактор ПИК и программа исследования фундаментальных взаимодействий // Вестник СПбГУ. Физика и химия. 2015. Т. 2. № 4. С. 309–318.
3. 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(121). С. 538–545. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-538-545
4. Lamoreaux K., Golub R. Experimental searches for the neutron electric dipole moment // Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics. 2009. V. 36. N 10. P. 104002. doi: 10.1088/0954-3899/36/10/104002
5. Chupp T.E., Fierlinger P., Ramsey-Musolf M.J., Singh J.T. Electric dipole moments of atoms, molecules, nuclei, and particles // Reviews of Modern Physics. 2019. V. 91. N 1. P. 015001. doi: 10.1103/RevModPhys.91.015001
6. Алтарев И.С., Борисов Ю.В., Боровикова Н.В. и др. Поиск электрического дипольного момента нейтрона // Ядерная физика. 1996. Т. 59. № 7. С. 1204–1222.
7. Serebrov A.P. Neutron beta-decay, Standard Model and cosmology // Physics Letters B. 2007. V. 650. N 5-6. P. 321–324. doi: 10.1016/j.physletb.2007.05.047
8. Young R., Clayton S., Filippone B.W., Geltenbort P., Ito T.M., Liu C.-Y., Makela M., Morris C.L., Plaster B., Saunders A., Seestrom S.J., Vogelaar R.B. Beta decay measurements with ultracold neutrons: a review of recent measurements and the research program at Los Alamos National Laboratory // Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics. 2014. V. 41. N 11. P. 114007. doi: 10.1088/0954-3899/41/11/114007

## References

1. Kovalchuk M.V., Aksenov V.L., Dragunov Yu.G. et al. First criticality of the PIK reactor. Power startup preparation plans. Proc. International Scientific and Technical Conference “Innovative Designs and Technologies of Nuclear Power”, 2012, pp. 42. (in Russian)
2. Serebrov A.P., Vassiljev A.V., Varlamov V.E. et al. Reactor PIK and program of fundamental interactions research. Vestnik SPbSU. Physics and Chemistry, 2015, vol. 2, no. 4, pp. 309–318. (in Russian)
3. Serebrov A.P., Lyamkin V.A., Koptuyukhov 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(121), pp. 538–545. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-538-545
4. Lamoreaux K., Golub R. Experimental searches for the neutron electric dipole moment. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 2009, vol. 36, no. 10, pp. 104002. doi: 10.1088/0954-3899/36/10/104002
5. Chupp T.E., Fierlinger P., Ramsey-Musolf M.J., Singh J.T. Electric dipole moments of atoms, molecules, nuclei, and particles. Reviews of Modern Physics, 2019, vol. 91, no. 1, pp. 015001. doi: 10.1103/RevModPhys.91.015001
6. Altarev I.S., Borisov Yu.V., Borovikova N.V. et al. Search for the neutron electric dipole moment. Physics of Atomic Nuclei, 1996, vol. 59, no. 7, pp. 1152–1170.
7. Serebrov A.P. Neutron beta-decay, Standard Model and cosmology. Physics Letters B, 2007, vol. 650, no. 5-6, pp. 321–324. doi: 10.1016/j.physletb.2007.05.047
8. Young R., Clayton S., Filippone B.W., Geltenbort P., Ito T.M., Liu C.-Y., Makela M., Morris C.L., Plaster B., Saunders A., Seestrom S.J., Vogelaar R.B. Beta decay measurements with ultracold neutrons: a review of recent measurements and the research program at Los Alamos National Laboratory. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 2014, vol. 41, no. 11, pp. 114007. doi: 10.1088/0954-3899/41/11/114007

9. Mathews G.J., Kajino T., Shima T. Big bang nucleosynthesis with a new neutron lifetime // *Physical Review D*. 2005. V. 71. N 2. P. 021302. doi: 10.1103/PhysRevD.71.021302
10. Wietfeldt F.E., Greene G.L. Colloquium: The neutron lifetime // *Reviews of Modern Physics*. 2011. V. 83. N 4. P. 1173–1192. doi: 10.1103/RevModPhys.83.1173
11. Serebrov A.P., Varlamov V.E., Kharitonov A.G., Fomin A., Pokotilovski Yu., Geltenbort P., Butterworth J., Krasnoschekova I., Lasakov M., Tal'daev R., Vassiljev A., Zherebtsov O. Measurement of the neutron lifetime using a gravitational trap and a low-temperature Fomblin coating // *Physics Letters B*. 2005. V. 605. N 1-2. P. 72–78. doi: 10.1016/j.physletb.2004.11.013
12. Serebrov A.P., Kolomenskii E.A., Fomin A.K., Koptuykhov A.O., Krasnoschekova I.A., Vasil'ev A.V., Prudnikov D.M., Shoka I.V., Chechkin A.V., Chaikovskii M.E., Varlamov V.E., Ivanov S.N., Pirozhkov A.N., Geltenbort P., Zimmer O., Jenke T., Van Der Grinten M., Tucker M. Experimental setup for neutron lifetime measurements with a large gravitational trap at low temperatures // *Technical Physics*. 2019. V. 64. N 2. P. 282–286. doi: 10.1134/S1063784219020191
13. Abele H. The neutron ABC: Measurements of correlation coefficients in neutron beta-decay // *Proc. 6<sup>th</sup> International UCN Workshop*. 2005. V. 110(4). P. 401.
14. Darius G., Byron W.A., DeAngelis C.R., Hassan M.T., Wietfeldt F.E., Collett B., Jones G.L., Dewey M.S., Mendenhall M.P., Nico J.S., Park H., Komives A., Stephenson E.J. Measurement of the electron-antineutrino angular correlation in neutron  $\beta$  decay // *Physical Review Letters*. 2017. V. 119. N 4. P. 042502. doi: 10.1103/PhysRevLett.119.042502
15. Bereziani Z., Bento L. Neutron - mirror - neutron oscillations: How fast might they be? // *Physical Review Letters*. 2006. V. 96. N 8. P. 081801. doi: 10.1103/PhysRevLett.96.081801
16. Serebrov A.P., Aleksandrov E.B., Dovator N.A., Dmitriev S.P., Fomin A.K., Geltenbort P., Kharitonov A.G., Krasnoschekova I.A., Lasakov M.S., Murashkin A.N., Shmelev G.E., Varlamov V.E., Vassiljev A.V., Zherebtsov O.M., Zimmer O. Experimental search for neutron-mirror neutron oscillations using storage of ultracold neutrons // *Physics Letters, Section B: Nuclear, Elementary Particle and High-Energy Physics*. 2008. V. 663. N 3. P. 181–185. doi: 10.1016/j.physletb.2008.04.014
17. Серебров А.П., Коптюхов А.О., Лямкин В.А. Численное моделирование естественной конвекции жидкого дейтерия в условиях реакторной тепловой нагрузки // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2019. Т. 62. № 8. С. 741–748. doi: 10.17586/0021-3454-2019-62-8-741-748
18. Huang Y.H., Chen G.B. A practical vapor pressure equation for helium-3 from 0.01 K to the critical point // *Cryogenics*. 2006. V. 46. N 12. P. 833–839. doi: 10.1016/j.cryogenics.2006.07.006
19. Капица П.Л. Теплоперенос и сверхтекучесть гелия-II // *ЖЭТФ*. 1941. Т. 11. № 6. С. 58.
20. Халатников И.М. Теория сверхтекучести. М.: Наука, 1971. 320 с.
21. Darve C., Patankar N.A., Van Sciver S.W. A 3-D model of superfluid helium suitable for numerical analysis // *Proc. 22<sup>nd</sup> International Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference (ICEC-ICMC)*. 2008. P. 261–266.
22. Bottura L., Darve C., Patankar N.A., Van Sciver W. A method for the three-dimensional numerical simulation of superfluid helium // *Journal of Physics: Conference Series*. 2009. V. 150. P. 012008. doi: 10.1088/1742-6596/150/1/012008
23. Leung K.K.H. Development of a new superfluid helium ultra-cold neutron source and a new magnetic trap for neutron lifetime measurements: PhD thesis. Technical University of Munich, 2013. 279 p.
9. Mathews G.J., Kajino T., Shima T. Big bang nucleosynthesis with a new neutron lifetime. *Physical Review D*, 2005, vol. 71, no. 2, pp. 021302. doi: 10.1103/PhysRevD.71.021302
10. Wietfeldt F.E., Greene G.L. Colloquium: The neutron lifetime. *Reviews of Modern Physics*, 2011, vol. 83, no. 4, pp. 1173–1192. doi: 10.1103/RevModPhys.83.1173
11. Serebrov A.P., Varlamov V.E., Kharitonov A.G., Fomin A., Pokotilovski Yu., Geltenbort P., Butterworth J., Krasnoschekova I., Lasakov M., Tal'daev R., Vassiljev A., Zherebtsov O. Measurement of the neutron lifetime using a gravitational trap and a low-temperature Fomblin coating. *Physics Letters B*, 2005, vol. 605, no. 1-2, pp. 72–78. doi: 10.1016/j.physletb.2004.11.013
12. Serebrov A.P., Kolomenskii E.A., Fomin A.K., Koptuykhov A.O., Krasnoschekova I.A., Vasil'ev A.V., Prudnikov D.M., Shoka I.V., Chechkin A.V., Chaikovskii M.E., Varlamov V.E., Ivanov S.N., Pirozhkov A.N., Geltenbort P., Zimmer O., Jenke T., Van Der Grinten M., Tucker M. Experimental setup for neutron lifetime measurements with a large gravitational trap at low temperatures. *Technical Physics*, 2019, vol. 64, no. 2, pp. 282–286. doi: 10.1134/S1063784219020191
13. Abele H. The neutron ABC: Measurements of correlation coefficients in neutron beta-decay. *Proc. 6<sup>th</sup> International UCN Workshop*, 2005, vol. 110(4), pp. 401.
14. Darius G., Byron W.A., DeAngelis C.R., Hassan M.T., Wietfeldt F.E., Collett B., Jones G.L., Dewey M.S., Mendenhall M.P., Nico J.S., Park H., Komives A., Stephenson E.J. Measurement of the electron-antineutrino angular correlation in neutron  $\beta$  decay. *Physical Review Letters*, 2017, vol. 119, no. 4, pp. 042502. doi: 10.1103/PhysRevLett.119.042502
15. Bereziani Z., Bento L. Neutron — mirror — neutron oscillations: How fast might they be? *Physical Review Letters*, 2006, vol. 96, no. 8, pp. 081801. doi: 10.1103/PhysRevLett.96.081801
16. Serebrov A.P., Aleksandrov E.B., Dovator N.A., Dmitriev S.P., Fomin A.K., Geltenbort P., Kharitonov A.G., Krasnoschekova I.A., Lasakov M.S., Murashkin A.N., Shmelev G.E., Varlamov V.E., Vassiljev A.V., Zherebtsov O.M., Zimmer O. Experimental search for neutron-mirror neutron oscillations using storage of ultracold neutrons. *Physics Letters, Section B: Nuclear, Elementary Particle and High-Energy Physics*, 2008, vol. 663, no. 3, pp. 181–185. doi: 10.1016/j.physletb.2008.04.014
17. Serebrov A.P., Koptuykhov A.O., Lyamkin V.A. Numerical modeling of natural convection of liquid deuterium under conditions of a reactor heat load. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, vol. 62, no. 8, pp. 741–748. (in Russian). doi: 10.17586/0021-3454-2019-62-8-741-748
18. Huang Y.H., Chen G.B. A practical vapor pressure equation for helium-3 from 0.01 K to the critical point. *Cryogenics*, 2006, vol. 46, no. 12, pp. 833–839. doi: 10.1016/j.cryogenics.2006.07.006
19. Kapitsa P.L. Helium-II heat transfer and superfluidity. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1941, vol. 11, no. 6, pp. 58. (in Russian)
20. Halatnikov I.M. *Theory of Superfluidity*. Moscow, Nauka Publ., 1971, 320 p. (in Russian)
21. Darve C., Patankar N.A., Van Sciver S.W. A 3-D model of superfluid helium suitable for numerical analysis. *Proc. 22<sup>nd</sup> International Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference (ICEC-ICMC)*, 2008, pp. 261–266.
22. Bottura L., Darve C., Patankar N.A., Van Sciver W. A method for the three-dimensional numerical simulation of superfluid helium. *Journal of Physics: Conference Series*, 2009, vol. 150, pp. 012008. doi: 10.1088/1742-6596/150/1/012008
23. Leung K.K.H. *Development of a new superfluid helium ultra-cold neutron source and a new magnetic trap for neutron lifetime measurements*. PhD thesis. Technical University of Munich, 2013, 279 p.

#### Авторы

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

**Лямкин Виталий Александрович** — младший научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, Гатчина, 188300,

#### Authors

**Anatoli P. Serebrov** — D.Sc., Corresponding Member of the RAS, Principal 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@npni.nrcki.ru

**Vitaliy A. Lyamkin** — Junior Researcher, Petersburg Nuclear Physics Institute named by B.P. Konstantinov of National Research Centre



Российская Федерация, Scopus ID: 56035040100, ORCID ID: 0000-0002-0640-9507, lyamkin\_va@pnpi.nrcki.ru

**Коптюхов Артём Олегович** — инженер, НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, Гатчина, 188300, Российская Федерация; аспирант, 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

**Коваленко Анатолий Николаевич** — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация; профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57193158368, ORCID ID: 0000-0001-9178-1129, Ras-kan@mail.ru

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

**Mikhail S. Onegin** — PhD, Senior 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

**Anatoly N. Kovalenko** — D.Sc., Professor, Leading Researcher, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57193158368, ORCID ID: 0000-0001-9178-1129, Ras-kan@mail.ru