

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ ЖИДКОГО ДЕЙТЕРИЯ В УСЛОВИЯХ РЕАКТОРНОЙ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ

А. П. СЕРЕБРОВ¹, А. О. КОПТЮХОВ^{1,2}, В. А. ЛЯМКИН¹

¹НИЦ „Курчатовский институт“ — ПИЯФ, 188300, Гатчина, Россия
E-mail: serebrov_ap@pnpi.nrcki.ru

²Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

В ПИЯФ на базе реактора ВВР-М создается высокопоточный источник ультрахолодных нейтронов с жидким дейтерием в качестве предзамедлителя реакторных нейтронов. Представлены результаты расчета конвективного потока жидкого дейтерия в дейтериевой капсуле источника в зависимости от мощности теплового потока и граничных условий. Численно исследованы структура потока, поля температуры и скорости жидкого дейтерия в источнике ультрахолодных нейтронов. Доказана возможность обеспечения теплового режима дейтериевой камеры при мощности тепловых потоков до 850 Вт. Выявлена зависимость структуры потока от граничных условий. Определено влияние этой зависимости на поле скоростей и тепловой поток.

Ключевые слова: нейтронная физика, источник ультрахолодных нейтронов, стандартная модель, численное моделирование, естественная конвекция, реактор ВВР-М

Введение. В физике элементарных частиц взаимодействия описывает Стандартная модель [1], все ее предсказания на текущий момент подтверждены экспериментально. Однако некоторые нерешенные проблемы Стандартная модель объяснить не может, к ним относятся: проблема иерархии фермионных масс, нарушение СР-инвариантности [2], нейтринные осцилляции [3], асимметрия материи и антиматерии [2]. В связи с этим появляются новые теории, которые лежат за пределами Стандартной модели, но также согласуются с экспериментальными данными. В настоящее время в областях теоретической и экспериментальной физики активно идет поиск отклонений от Стандартной модели.

Одним из предметов исследований является свободный нейтрон, поскольку многие теории вне Стандартной модели предсказывают наличие у него электрического дипольного момента, существование нейтрон-антинейтронных осцилляций, зеркальных нейтронов [4]. Для экспериментального подтверждения этих предсказаний ставятся эксперименты с ультрахолодными нейтронами (энергия ниже 10^{-7} эВ), поскольку их можно длительное время хранить в замкнутых сосудах [5]. Статистическая точность этих экспериментов зависит от потока ультрахолодных нейтронов (УХН). Сейчас наибольшей интенсивностью обладает источник УХН в Институте Луи-Ланжевена (Франция). На базе реактора ВВР-М НИЦ „Курчатовский институт“ ПИЯФ в Гатчине ведутся работы по созданию источника УХН [6], расчетная интенсивность которого должна превысить интенсивность французского аналога на два порядка [7].

В этих источниках используются разные принципы конверсии холодных нейтронов (энергия $5 \cdot 10^{-3}—10^{-7}$ эВ) в ультрахолодные. В Институте Луи-Ланжевена используется расширение нейтронного газа в турбине, в ПИЯФ — возбуждение нейтронами фононов в сверхтекучем гелии с потерей энергии нейтронами [8]. Поддержание гелия в сверхтекучем состоянии обеспечивается вакуумной откачкой его паров. Для предварительного замедления реакторных нейтронов в обоих источниках используется жидкий дейтерий. Принципиальным отличием является то, что в ПИЯФ источник находится непосредственно в активной зоне реактора ВВР-М. Такое расположение требует активного термостатирования жидкого дейтерия при объемном тепловом потоке, возникающем за счет гамма-квантов [9].

Основная сложность заключается в том, что дейтерий находится в жидком состоянии лишь при температуре 18,73—24,12 К. Поскольку тепловой поток в жидком дейтерии обусловлен естественной конвекцией, целесообразно проводить численное моделирование процессов теплообмена в дейтериевой камере источника.

Описание установки. Источник УХН на реакторе ВВР-М состоит из двух помещенных друг в друга камер: одна (объемом 40 л) со сверхтекучим гелием, другая (60 л) — с жидким дейтерием. Обе камеры расположены в алюминиевом вакуумном контейнере, выполняющем функции защитной оболочки. Расположенный перед вакуумным контейнером свинцовый экран защищает от гамма-излучения из активной зоны реактора, вносящего вклад в тепловые потоки на конструктивных элементах источника, гелии и дейтерии. Источник имеет три температурные зоны: камеру со сверхтекучим гелием, камеру с жидким дейтерием, вакуумный корпус со свинцовым экраном и графитовыми блоками (рис. 1) [10].

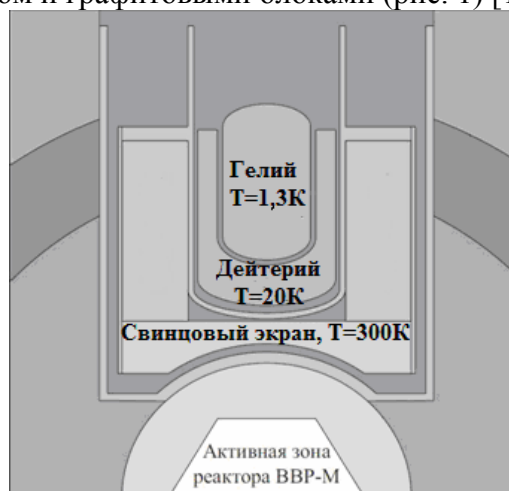


Рис. 1

Сверхтекучий гелий поступает из криостата, где низкая температура достигается вакуумной откачкой паров гелия до давления 50 Па [11]. Температура в гелиевой камере источника также поддерживается вакуумной откачкой, ее эффективность при реакторной нагрузке до 60 Вт доказана в [12].

Жидкий дейтерий термостатируется газообразным гелием. Дейтериевая капсула имеет двойную стенку. По каналу (ширина 2 мм) в стенке осуществляется проток гелия от рефрижератора (рис. 2). Охлаждающий гелий подается в дейтериевую капсулу через патрубок. Далее гелий поступает в коллектор, где равномерно распределяется и движется по внутреннему кольцевому зазору, затем через трубку попадает во внешний кольцевой зазор и движется по нему в обратную сторону, после чего поступает в отводящий коллектор, соединенный с выходным патрубком. Температура гелия на входе в капсулу 20 К обеспечивается нагревателем. Нагрев необходим для обеспечения пассивной безопасности реактора ВВР-М. При меньшей температуре необходимо было бы применять активные методы терморегулирования, чтобы

не допустить нежелательного затвердевания дейтерия в отсутствие реакторной тепловой нагрузки.

Тепловая модель. Согласно нейтронно-физическому расчету, объемный тепловой поток в дейтериевой камере $Q_{Al} + Q_{d2} \approx 250$ Вт при мощности реактора ВВР-М 18 МВт на расстоянии 25 см от активной зоны [13, 14]. Тепловой поток может изменяться в зависимости от мощности реактора, наличия свинцовой защиты в активной зоне. Исходя из возможностей рефрижератора TFC-50 при расчете были заданы следующие граничные условия: лучистый тепловой поток $Q_{луч} = 24$ Вт/м²; температура гелия на входе $T_{вх} = 20$ К; давление гелия на выходе $P_{вых} = 188$ 100 Па; массовый расход гелия на входе $G_{вх} = 30$ —110 г/с (рис. 2).

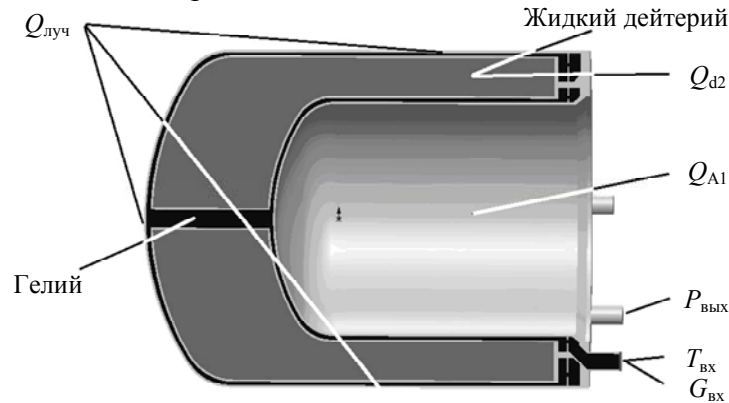


Рис. 2

Математическая модель. Для численного моделирования тепловых процессов в дейтериевой камере использован пакет Comsol Multiphysics. Системы уравнений решены методом конечных элементов. Передача теплоты теплопроводностью в используемой математической модели описывается для стационарного режима:

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

где ρ — объемная плотность материала, кг/м³; c_p — теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К); \mathbf{v} — вектор скорости, м/с; T — абсолютная температура, К; q — удельный тепловой поток, Вт/м².

Движение жидкостей описывает уравнение Навье-Стокса, решаемое совместно с уравнением неразрывности и двумя дополнительными уравнениями для расчета кинетической энергии турбулентности и удельной скорости диссипации кинетической энергии:

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

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

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

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

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

где \mathbf{v} — скорость течения, м/с; p — давление, Па; μ — динамическая вязкость, Па·с; μ_t — турбулентная вихревая вязкость, Па·с; \mathbf{g} — ускорение свободного падения, м/с²; k — кинетическая энергия турбулентности, Дж; ω — удельная скорость диссипации кинетической энергии, Дж/с; α , σ_k^* , σ_ω , β_0 , β_0^* — параметры турбулентной модели.

Результаты. Расчет выполнен с разными значениями массового расхода охлаждающего гелия и при разной тепловой нагрузке. На рис. 3 представлены расчетные данные: a — для

максимальной температуры дейтерия при разных режимах работы рефрижератора (1 — $Q=50$, 2 — $Q=250$, 3 — $Q=450$, 4 — $Q=650$, 5 — $Q=850$ Вт), б — для температурных параметров дейтериевой камеры при $G_{вх}=50$ г/с (1 — температура гелия на выходе, 2 — максимальная температура дейтерия, 3 — максимальная температура корпуса).

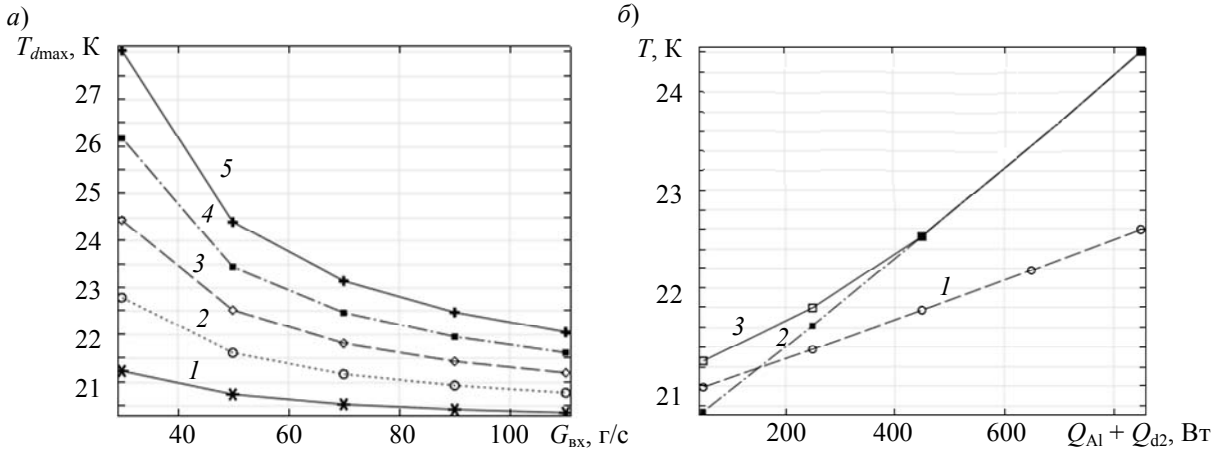


Рис. 3

Исходя из расчетов, термостатирование дейтерия в капсуле объемом 60 л возможно при мощности тепловых потоков до 850 Вт. Максимальная температура жидкого дейтерия близка к средней температуре гелия со смещением в большую сторону, более заметным при малых тепловых потоках. Начиная с суммарного потока 450 Вт максимальная температура дейтерия близка к максимальной температуре корпуса вследствие интенсификации теплообмена, связанного с ростом скорости потока жидкого дейтерия при большей разности температур между стенками, вызванной нагревом охлаждающего гелия. В условиях тепловой нагрузки от реактора ВВР-М возможно обеспечить тепловой режим расходом гелия 50 г/с.

На рис. 4 представлены: температурное поле в сечении, К (а); структура потока (б); векторы скоростей, мм/с (в); изотермические линии в сечении, К (г); поле скоростей в сечениях, мм/с (д, е) при массовом расходе охлаждающего гелия 50 г/с и суммарной мощности теплового потока 250 Вт.

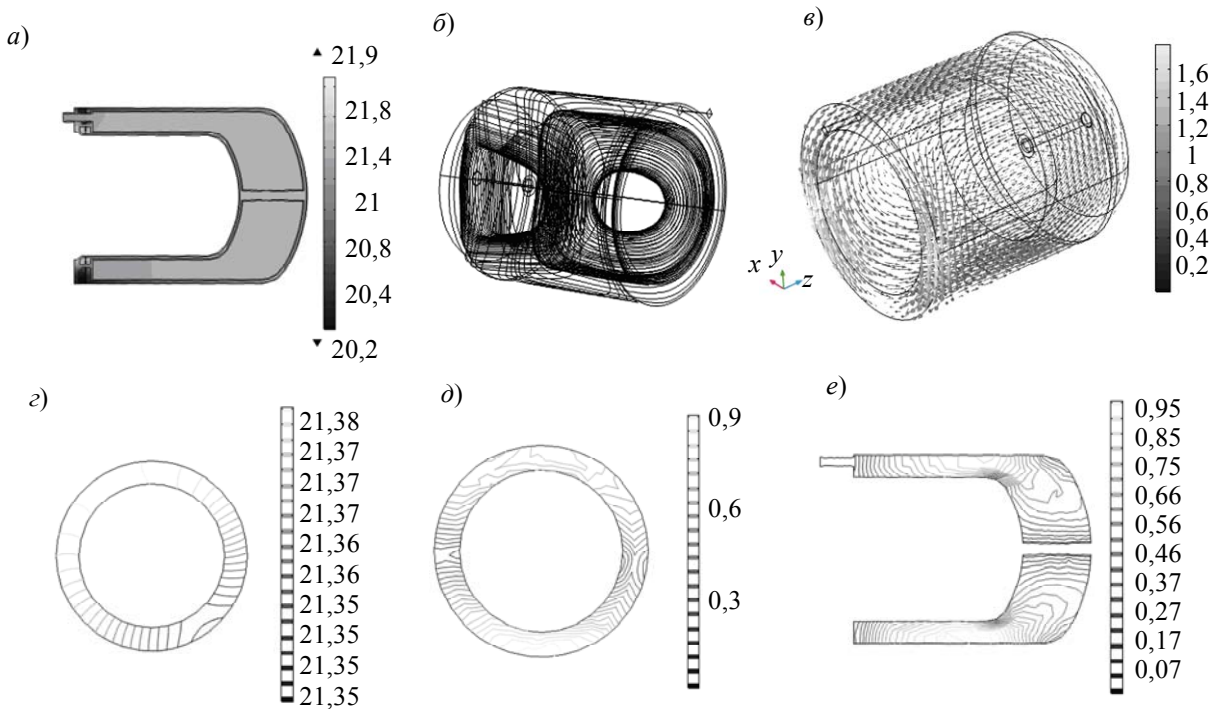


Рис. 4

Конвективная теплоотдача к стенкам алюминиевой капсулы колеблется от 10 до 950 Вт/м². Изменение плотности конвективной составляющей теплового потока вызвано разбросом скорости потока носителя тепла.

При разности температур между внешней и внутренней обечайкой дейтериевой капсулы в 1,5 К наблюдается переход типа стационарного режима естественной конвекции. При меньшей разности температур — с двумя термиками вдоль экваториальной области (рис. 5, а—в), при большей — с четырьмя (рис. 5, з—е). На рис. 5 приведены: структура течения (а, з); направление скорости (б, д), мм/с; поле температур (в, е), К, в сечении при сумме мощностей объемных тепловых потоков в дейтериевой капсуле до 450 Вт (а—в) и при 450 Вт и выше (з—е).

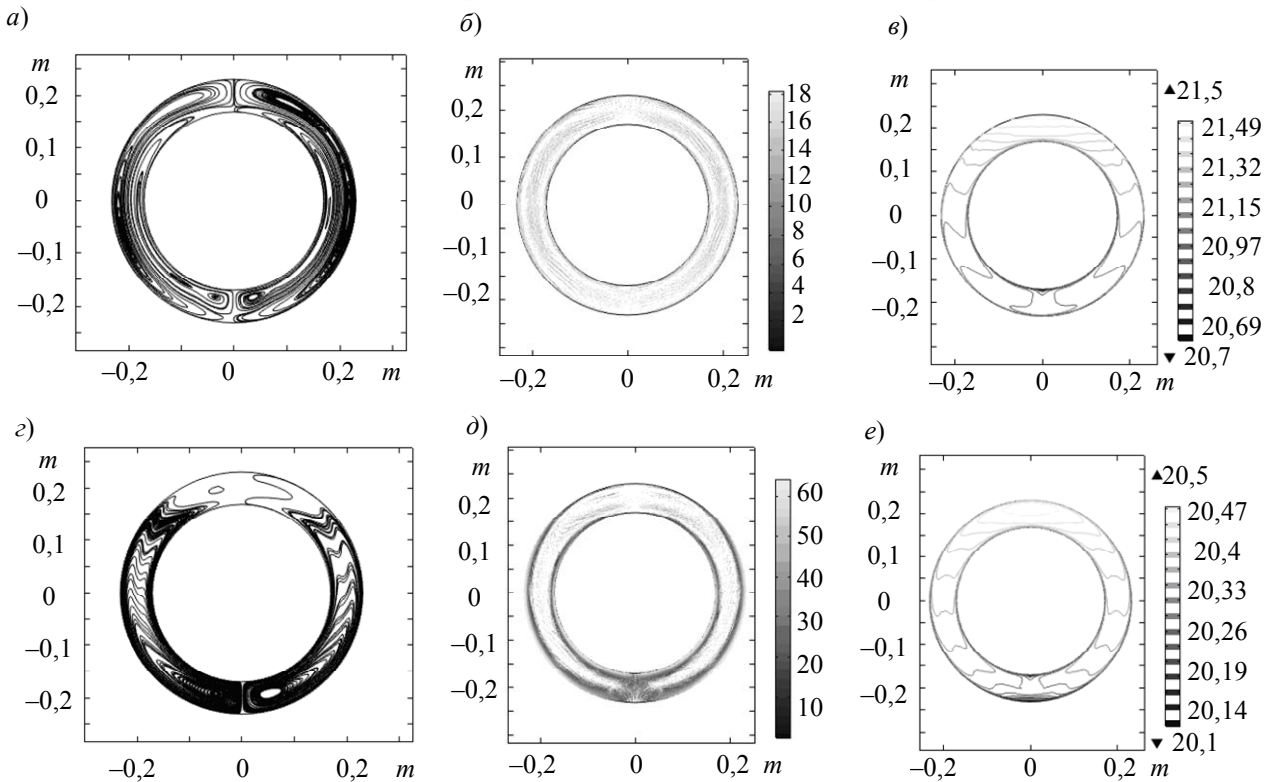


Рис. 5

На рис. 6 представлено изменение скорости потока жидкого дейтерия и теплоотдачи при переходе типа течения. Этот переход вносит ощутимый вклад в изменение поля скоростей и теплоотдачу от дейтерия к стенкам капсулы.

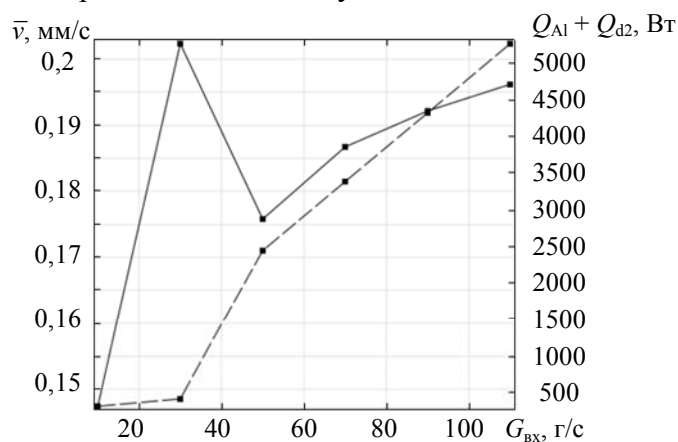


Рис. 6

Зависимость мощности теплового потока от дейтерия к стенкам от расхода охлаждающего гелия линейная. При двухвихревом типе течения эта зависимость менее выражена. Зависимость средней скорости потока по всему объему дейтерия от расхода нелинейна. При

двухвихревом типе течения скорость возрастает быстрее при увеличении расхода, чем при четырехвихревом.

Вывод. Численно исследованы структура потока, поля температуры и скорости жидкого дейтерия в источнике ультрахолодных нейтронов. Наблюдался установившийся режим. Доказана возможность обеспечения теплового режима дейтериевой камеры при мощности тепловых потоков до 850 Вт. Выявлена зависимость структуры потока от граничных условий. Определено влияние этой зависимости на поле скоростей и тепловой поток.

Работа поддержана грантом Российского научного фонда (проект №14-22-00105).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянов В. М. Стандартная модель и ее расширения. М.: Физматлит, 2007. 584 с. ISBN 978-5-922108-30-0.
2. Сахаров А. Д. Нарушение CP-инвариантности, C-асимметрия и барионная асимметрия вселенной // Письма в ЖЭТФ. 1967. Т. 5, вып. 1. С. 32—35.
3. Понятов А. „Оборотни“ микромира // Наука и жизнь. 2015. № 11. С. 12—17.
4. Dubbers D., Schmidt M. G. The neutron and its role in cosmology and particle physics // Rev. Mod. Phys. 2011. Vol. 83. P. 1111—1171.
5. Федоров В. В. Нейтронная физика. СПб: ПИЯФ, 2004. 334 с.
6. 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 // Вестн. Санкт-Петербургского университета. Физика и химия. 2015. № 1. С. 27—41.
7. 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, N 4. P. 633—637.
8. Ахизер А. И., Померанчук И. Я. О рассеянии нейтронов с энергией несколько градусов в жидком гелии II // ЖЭТФ. 1946. № 16. С. 391.
9. 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 Всерос. молодежного научного форума OpenScience. Гатчина: НИЦ „Курчатовский институт“ — ПИЯФ, 2018. С. 29.
10. Серебров А. П., Митюхляев В. А., Захаров А. А. и др. Проект источника ультрахолодных и холодных нейтронов на реакторе ВВР-М со сверхтекучим гелием в качестве замедлителя // ФТТ. 2010. Т. 52, № 5. С. 969—973.
11. Serebrov A. P., Lyamkin V. A., Fomin A. K., Samodurov O. Yu., Kanin A. S. UCN source with superfluid helium at WWR-M reactor // J. of Physics. Conf. Series. 2017. Vol. 798, N 1. P. 012147.
12. Серебров А. П., Лямкин В. А., Прудников Д. В. и др. Запуск полномасштабной модели источника ультрахолодных нейтронов со сверхтекучим гелием // ЖТФ. 2017. Т. 87, № 2. С. 301—305.
13. Serebrov A. P., Kislitsin B. V., Onegin M. S., Lyamkin V. A., Prudnikov D. V., Ilatovskiy 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, N 9—10. P. 1391—1396.
14. Серебров А. П., Кислицын Б. В., Онегин М. С. Энерговыделение и поле температур в источнике ультрахолодных нейтронов на реакторе ВВР-М ПИЯФ // Ядерная физика и инжиниринг. 2015. Т. 6, № 5—6. С. 297—303.

Сведения об авторах

Анатолий Павлович Серебров

— д-р физ.-мат. наук, член-корр. Академии наук; Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова национального исследовательского центра „Курчатовский институт“, Отделение нейтронных исследований; E-mail: serebrov_ap@npfi.nrcki.ru

Артем Олегович Коптюхов

— магистрант; Университет ИТМО; факультет низкотемпературной энергетики; E-mail: artemk@niuitmo.ru

Виталий Александрович Лямкин — канд. физ.-мат. наук; Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова национального исследовательского центра „Курчатовский институт“, Отделение нейтронных исследований

Поступила в редакцию
17.04.19 г.

Ссылка для цитирования: Серебров А. П., Коптюхов А. О., Лямкин В. А. Численное моделирование естественной конвекции жидкого дейтерия в условиях реакторной тепловой нагрузки // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 8. С. 741—748.

NUMERICAL MODELING OF NATURAL CONVECTION OF LIQUID DEUTERIUM UNDER CONDITIONS OF A REACTOR HEAT LOAD

A. P. Serebrov¹, A. O. Koptyukhov^{1,2}, V. A. Lyamkin¹

¹*B. P. Konstantinov St. Petersburg Nuclear Physics Institute of National Research Center “Kurchatov Institute”, 188300, Gatchina, Russia*

E-mail: serebrov_ap@pnpi.nrcki.ru

²*ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia*

In St. Petersburg Nuclear Physics Institute, on the basis of the WWR-M reactor, a high-flux source of ultracold neutrons is created with liquid deuterium as a pre-moderator of reactor neutrons. Results of calculations of liquid deuterium convective flow in the source's deuterium capsule are presented depending on the heat flux and boundary conditions. The structure of the flow, temperature field, and velocity of liquid deuterium in the source of ultracold neutrons are numerically studied. The possibility of providing the thermal regime of a deuterium chamber with a heat flux power of up to 850 watts is proven. The dependence of the flow structure on the boundary conditions is analyzed. The influence of this dependence on the velocity field and heat flux is revealed.

Keywords: neutron physics, ultracold neutron source, standard model, numerical simulation, natural convection, WWR-M reactor

REFERENCES

1. Emel'yanov V.M. *Standartnaya model' i yeye rasshireniya* (Standard Model and Its Extensions), Moscow, 2007, 584 p. ISBN 978-5-922108-30-0. (in Russ.)
2. Sakharov A.D. *Pis'ma v Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, 1967, no. 1(5), pp. 32–35. (in Russ.)
3. Ponyatov A. *Nauka i zhizn'*, 2015, no. 11, pp. 12–17. (in Russ.)
4. Dubbers D., Schmidt M.G. *Rev. Mod. Phys.*, 2011, vol. 83, pp. 1111–1171.
5. Fedorov V.V. *Neytronnaya fizika* (Neutron Physics), St. Petersburg, 2004, 334 p. (in Russ.)
6. Serebrov A.P., Fomin A.K., Kharitonov A.G., Lyamkin V.A., Prudnikov D.V., Ivanov S.A., Erykalov A.N., Onegin M.S., Mityukhlyayev V.A., Zakharov A.A., Gridnev K.A. *Vestnik of Saint Petersburg University. Physics And Chemistry*, 2015, no. 1, pp. 27–41. (in Russ.)
7. Onegin M.S., Serebrov A.P., Fomin A.K., Lyamkin V.A. *Technical Physics*, 2017, no. 4(62), pp. 633–637.
8. Akhizezer A.I., Pomeranchuk I.Ya. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1946, no. 16, pp. 391. (in Russ.)
9. Serebrov A.P., Lyamkin V.A., Koptyukhov A.O., Onegin M.S., Prudnikov D.V., Samodurov O.Yu., Ivanov S.N. *Sbornik tezisov V Vserossiyskogo molodezhnogo nauchnogo foruma OpenScience* (Abstracts of the V All-Russian Youth Scientific Forum OpenScience), Gatchina, Research Center “Kurchatov Institute” - PNPI, 2018, pp. 29. (in Russ.)
10. Serebrov A.P., Mityukhlyayev V.A., Zakharov A.A., Erykalov A.N., Onegin M.S., Fomin A.K., Ilatovskiy V.A., Orlov S.P., Konoplev K.A., Krivshich A.G., Samsonov V.M., V Ezhov.F., Fedorov V.V., Keshishev K.O., Boldarev S.T., and Marchenko V.I. *Physics of the Solid State*, 2010, no. 5(52), pp. 1034–1039.
11. Serebrov A.P., Lyamkin V.A., Fomin A.K., Samodurov O.Yu., Kanin A.S. *Journal of Physics Conference Series*, 2017, no. 1(798), pp. 012147.
12. Serebrov A.P., Lyamkin V.A., Prudnikov D.V., Keshishev K.O., Boldarev S.T. and Vasil'ev A.V. *Technical Physics*, 2017, no. 2(87), pp. 329–333.
13. Serebrov A.P., Kislitsin B.V., Onegin M.S., Lyamkin V.A., Prudnikov D.V., Ilatovskiy V.A., Orlov S.P., Kirsanov G.A., Fomin A.K., Filchenkova D.V. *Physics of Atomic Nuclei*, 2016, no. 9-10(79), pp. 1391–1396.
14. Serebrov A.P., Kislitsin B.V., Onegin M.S. *Nuclear Physics and Engineering*, 2015, no. 5(6), pp. 297–303.

Data on authors

Anatoly P. Serebrov — B. P. Konstantinov St. Petersburg Nuclear Physics Institute of National Research Center “Kurchatov Institute”, Neutron Research Department;
E-mail: serebrov_ap@pnpi.nrcki.ru

- Artem O. Koptuykhov** — Undergraduate Student; ITMO University, Faculty of Cryogenic Engineering; E-mail: artemk@niuitmo.ru
- Vitaly A. Lyamkin** — PhD; B. P. Konstantinov St. Petersburg Nuclear Physics Institute of National Research Center “Kurchatov Institute”, Neutron Research Department

For citation: 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, N 8. P. 741—748 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-8-741-748