

УДК 621.039.6.536.24

Исследование влияния термогравитационной конвекции на теплообмен на примере течения жидкого металла в активной зоне ядерного реактора на быстрых нейтронах

А.О. Новиков¹, Н.Г. Разуванов², В.Г. Свиридов¹

¹ *Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 112250, Россия*

² *Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, 125412, Россия*
e-mail: sviridovvg@gmail.com; andnov92@mail.ru

Поступила в редакцию 08.08.2019

После доработки 04.09.2019

Принята к публикации 05.09.2019

При выполнении теплогидравлического расчета в процессе проектирования ядерных реакторов используются машинные коды, которые основаны на действующих расчетно-теоретических моделях. Подобные модели сегодня не учитывают влияние свободной конвекции на теплообмен жидкого металла. Однако последние исследования научной группы МЭИ–ОИВТ РАН показывают, что термогравитационная конвекция оказывает влияние на температуру и температурные пульсации при течении жидкого металла. Цель этой работы состоит в том, чтобы изучить влияние термогравитационной конвекции на теплообмен при течении жидкого металла в канале, имитирующем топливную сборку ядерного реактора с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем.

Ключевые слова: ядерный реактор, эксперимент, зондовый метод, ртуть, термогравитационная конвекция, теплообмен, жидкий металл.

Введение

В настоящее время ядерная энергетика России использует АЭС с энергоблоками, оснащенными реакторами на тепловых нейтронах типа ВВЭР и РБМК, работающими в открытом ядерном топливном цикле. В дальнейшем развитие ядерной энергетике может пойти двумя путями: совершенствование на базе существующих типов тепловых реакторов с открытым ядерным топливным циклом, в котором сжигается лишь ^{235}U , или формирование замкнутого ядерного топливного цикла с вводом быстрых реакторов, обеспечивающих простое либо расширенное воспроизводство ядерного топлива (реакторы с коэффициентом воспроизводства ≥ 1) [1, 2]. Второй путь развития позволяет вовлечь в использование ^{238}U , содержание которого в природных источниках достигает 99.3%, путем наработки делящегося плутония и таким образом увеличить в 200 раз выход энер-

гии с каждой тонны урана, что позволяет разрабатывать даже бедные урановые месторождения. В отличие от реакторов типа ВВЭР и РБМК в быстрых реакторах вода, как и любое водородосодержащее вещество, не может использоваться в качестве теплоносителя из-за свойства замедлять нейтроны. Поэтому в качестве теплоносителей используются легкоплавкие металлы. Одним из проектов реактора на быстрых нейтронах в России является БРЕСТ, разрабатываемый АО «НИКИЭТ» совместно с другими институтами [3]. В реакторе используется свинцовый теплоноситель. Далее в этой работе за основу будет взята конфигурация, по своей геометрии приближенная к элементу активной зоны реактора, созданная из соображений удобства эксперимента. При проектировании реакторов выполняется теплогидравлический расчет активной зоны на основе действующих расчетно-теоретических моделей при помощи

машинных кодов. Однако эти модели сегодня не учитывают влияние свободной конвекции на теплообмен жидкого металла. Цель работы заключается в том, чтобы изучить теплообмен при возможном влиянии термогравитационной конвекции на теплообмен при течении жидкого металла в канале сложной формы, сопоставимой с элементом активной зоны ядерного реактора. Эксперимент проводят на ртути вследствие более низкого коэффициента теплопроводности и жидкого состояния при комнатной температуре. Все эксперименты проводились на уникальном ртутном стенде МЭИ–ОИВТ РАН РК-1 [4].

Конструкция опытного участка

Канал

Канал образован тремя одинаковыми частями трубы, имитирующими твэлы, каждая из которых представляет собой шестую часть целой трубы. Между ними находятся плоские перегородки шириной 11 мм, сваркой соединенные с трубами. Длина опытного участка составляет 1 м. Поперечное сечение опытного участка представлено на рис. 1.

Обогрев опытного участка осуществляется электрическим нагревателем. Нагреватель выполнен из нихромовой ленты сечением 6×0.2 мм. Для определения тепловых потерь в конструкции опытного участка предусмотрены три тепломера.

Фактически канал представляет собой фрагмент пучка труб с параметром $\chi = P/D$, где P – расстояние между осями труб, а D – диаметр труб, ограниченный металлическими необогреваемыми стенками. Ниже в статье будет показано сравнение этой геометрии с самим пучком труб и круглой трубой.

Измерительный зонд

Зонд, используемый для измерения профиля температур, представляет собой неравноплечий рычаг, который может поворачиваться вокруг шарнира. Плечо, на конце которого закреплена термопара, через сильфон вводится в опытный участок, в котором проводится измерение поля температуры [5].

Перемещение кончика термопары осуществляется в двух взаимно перпендикулярных направлениях при помощи координатного механизма, представляющего собой два

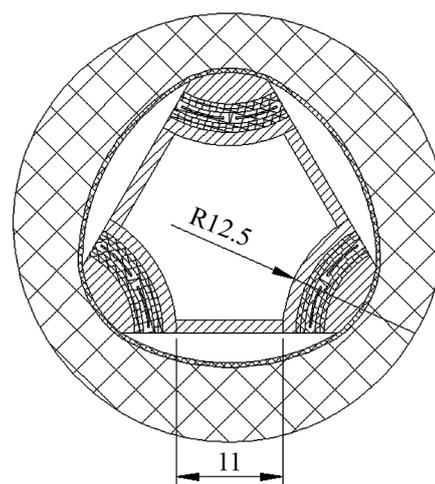


Рис. 1. Разрез поперечного сечения опытного участка

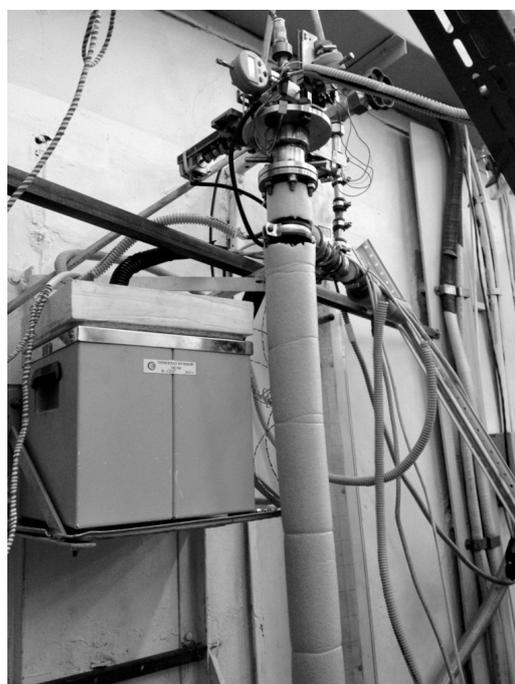


Рис. 2. Фотография опытного участка в сборе

регулируемых винта, а его положение фиксируется двумя индикаторами, установленными на этих винтах.

На рис. 2 показан опытный участок в сборе, установленный на ртутном контуре.

Методика эксперимента

Для определения качества теплообмена используются коэффициенты теплоотдачи и контролируется температура на обогреваемой стенке, чтобы предотвратить возможное разрушение тепловыделяющего элемента.

Коэффициент теплоотдачи определяется выражением [6]:

$$\alpha = \frac{q_c}{T_c - \bar{T}},$$

где T_c – температура стенки, q_c – тепловой поток на стенке.

Определение плотности теплового потока

Плотность теплового потока определяется по подводимой электрической мощности с учетом тепловых потерь:

$$q_c = \frac{UI - Q_{пот}}{F},$$

где U, I – напряжение и ток нагревателя, $Q_{пот}$ – тепловые потери, F – площадь поверхности теплообмена.

Определение среднemasсовой температуры

Среднемассовая температура \bar{T} определяется следующим образом. При постоянной по длине плотности теплового потока среднemasсовая температура жидкости изменяется по линейному закону. Следовательно:

$$\bar{T} = (\bar{T}_{вых} - \bar{T}_{вх}) \frac{x}{L},$$

где $\bar{T}_{вых}$ и $\bar{T}_{вх}$ – среднemasсовые температуры соответственно в выходном и входном сечениях, x – расстояние от начала канала до измеряемого сечения. Для измерения температуры входа и выхода на опытном участке установлены термопары.

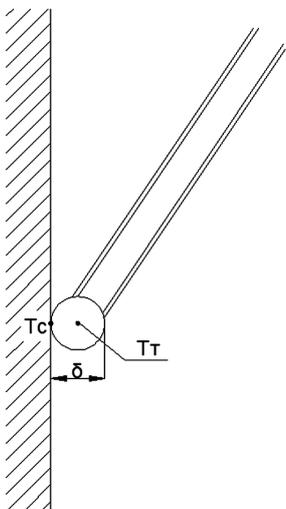


Рис. 3. Определение температуры стенки зондовым методом

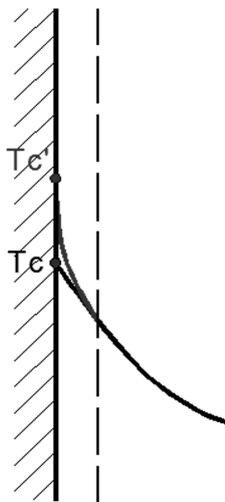


Рис. 4. Профиль температуры вблизи стенки

Определение температуры стенки

В используемой в наших экспериментах методике температура стенки определяется с помощью зонда по показанию термопары в момент касания королька термопары стенки канала, как показано на рис. 3.

$$T_c = T_T + \frac{q_c \cdot \delta}{2\lambda_{рт}},$$

где T_T – показания термопары в момент касания, δ – толщина королька термопары, $\lambda_{рт}$ – теплопроводность ртуты.

Растворенные частицы окислов, концентрирующиеся вблизи обогреваемых стенок канала, могут существенно уменьшить теплопроводность металла вблизи стенки. В этом случае температурный профиль вблизи стенки в «загрязненном» металле будет отличаться от профиля в чистом металле, как это показано на рис. 4.

Для сравнения данных, полученных в разных режимах, удобно использовать безразмерную температуру, которая вычисляется по формуле:

$$\theta = \frac{(T - \bar{T})\lambda}{q_c \cdot d_{эКВ}},$$

где $d_{эКВ}$ – гидравлический диаметр канала.

При этом безразмерная температура стенки по смыслу равна обратному числу Нуссельта.

Результаты экспериментов

В процессе исследований были проведены эксперименты для режимов течения, характеризующихся параметрами, представленными в таблице.

Параметры, при которых проводились эксперименты

№	Gr_q	Re
1	4.5×10^7	27000
2	4.5×10^7	38000
3	4.5×10^7	45500
4	4.5×10^7	16000
5	6.0×10^7	38000
6	4.5×10^7	52000

В качестве режимных параметров здесь выступают число Рейнольдса $Re = \frac{U_0 d}{\nu}$ и

число Грасгофа $Gr_q = \frac{g\beta q_c d^4}{\nu\lambda}$, где U_0 –

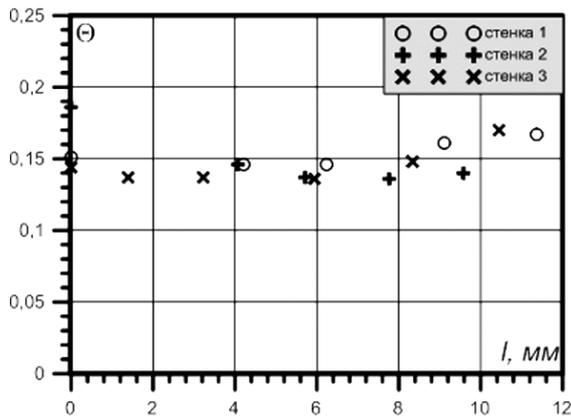


Рис. 5. Сравнение безразмерных температур для каждой стенки

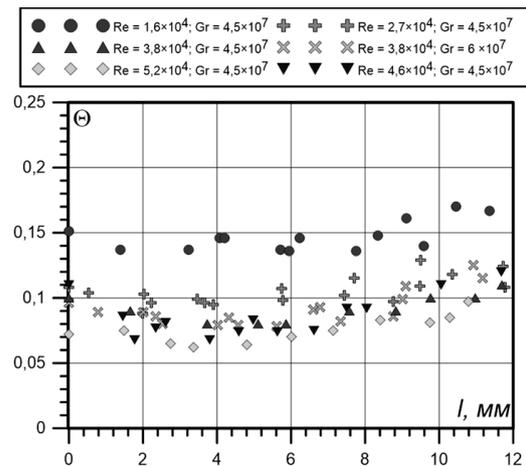


Рис. 6. Безразмерная температура стенки для каждого режима

среднемассовая скорость потока, м/с; d – эквивалентный диаметр канала (в нашем случае $d = 17.5$ мм), мм; ν – кинематическая вязкость ртути, м²/с; g – ускорение свободного падения, 9.81 м/с²; β – температурный коэффициент объемного расширения ртути, 1/К; q_c – тепловой поток на стенке обогреваемых участков трубы, Вт/м²; λ – теплопроводность ртути, Вт/(м·К).

На рис. 5 представлен график безразмерной температуры для каждой из трех стенок для режима, характеризуемого параметрами $Re = 16000$, $Gr_q = 4.5 \times 10^7$.

Из графика видно, что в целом с учетом погрешности безразмерные температуры стенки соотносятся друг с другом, соответственно стенки канала однородны и температура распределена равномерно. Следовательно, мы можем осреднить температуру для всех трех стенок и для каждого значения Gr вывести их на общий график, представленный на рис. 6.

Для описания процесса теплообмена в жидких металлах различными авторами было выведено несколько эмпирических формул зависимости числа Нуссельта $Nu = \frac{1}{\Theta} = \frac{q_c d}{\lambda(T_c - \bar{T})}$ от

числа $Re = \frac{U_0 d}{a}$ для различных задач теплообмена (здесь a – температуропроводность ртути). В этой статье мы рассмотрим и сравним для нашего канала следующие формулы для расчета в круглых трубах и трубных пучках.

- Формула Лайона [7]:

$$Nu = 7 + 0.025Pe^{0.8}.$$

- Формула, разработанная в ФЭИ В.И. Субботинным и коллегами [8]:

$$Nu = 5 + 0.025Pe^{0.8}.$$

- Формула, предложенная П.Л. Кирилловым и П.А. Ушаковым [9]:

$$Nu = 4.5 + 0.018Pe^{0.8}.$$

- Для расчета пучков труб рассмотрим формулу, также предложенную П.Л. Кирилловым и П.А. Ушаковым [10]:

$$Nu = 7.55\chi - 20\chi^{-13} + (0.041\chi^{-2})Pe^{0.56+0.19\chi}.$$

Здесь за χ принимаем соотношение шага P к диаметру труб D , соответствующее нашему каналу:

$$\chi = \frac{P}{D} = \frac{36}{25} = 1.44:$$

$$Nu = 10.7 + 0.020Pe^{0.83}.$$

- Для расчета теплообмена в треугольном канале используется формула для расчета теплообмена [11]:

$$Nu = \frac{2}{3}Nu_s + 0.015Pe^{0.83}.$$

При этом для угла 90° (как в рассматриваемом канале) соответствует значение $Nu_s = 6.5$. Таким образом, итоговая формула:

$$Nu = 4.33 + 0.015Pe^{0.83}.$$

Сведем все описанные зависимости на один график, представленный на рис. 7, и сравним их с полученными экспериментальными данными.

Из графика можно увидеть, что экспериментальные данные лучше всего ложатся на формулу ФЭИ [8]. Однако при малых числах Re экспериментальные точки идут ниже этой зави-

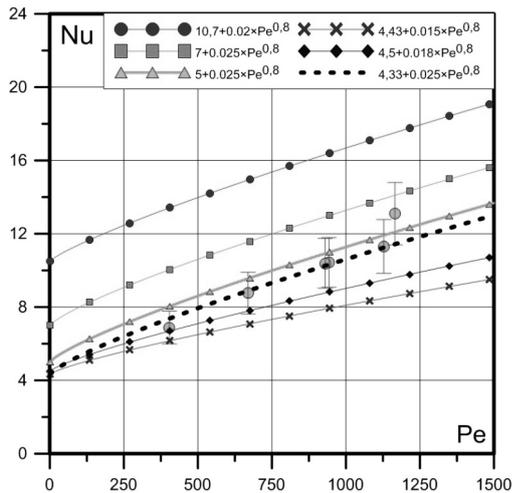


Рис. 7. Зависимости $Nu(Pe)$ и полученные экспериментальные данные

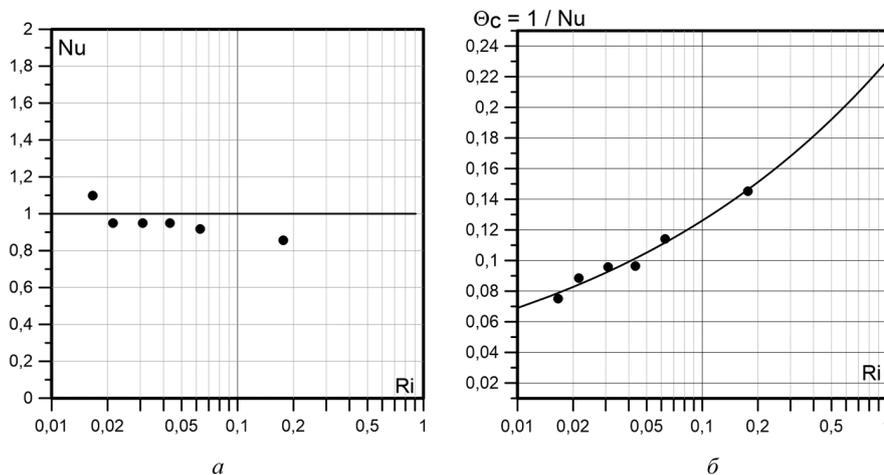


Рис. 8. Нормированный график $Nu(Ri)$ (а) и ненормированный график $\Theta_c(Ri)$ (б)

симости. Теперь нормируем полученные экспериментальные данные на формулу ФЭИ [8] и посмотрим их отличие от нее на графике зависимости $Nu(Ri)$, где $Ri = Gr_f / Re^2$ – число Ричардсона (рис. 8). Отообразим также и ненормированный график безразмерной температуры от числа Ri .

На рис. 8, а видно, что при увеличении числа Ri экспериментальные точки смещаются вниз от единицы (т.е. от числа Nu , рассчитанного по формуле (8)). На рис. 8, б экспериментальные точки очень хорошо экстраполируются простой степенной формулой. И то и другое говорит о влиянии термогравитационной конвекции на теплообмен при малых расходах и числах Re , т.е. при малых Pe и больших Ri .

В заключение вернемся к зависимости $Nu(Pe)$ на рис. 7. Обнаружено, что экспериментальные данные лучше всего экстраполи-

руются «синтезированной» зависимостью, состоящей из турбулентного приращения $0.025Pe^{0.8}$, и стержневым числом Нуссельта, рассчитанным из формулы для треугольных каналов при угле 90° $Nu_s = 4.33$ [11]. Эта зависимость отображена на рис. 7 черным пунктиром: $Nu = 4.33 + 0.025Pe^{0.8}$.

Заключение

В рамках исследований, проводимых научной группой МЭИ–ОИВТ РАН, рассмотрено влияние термогравитационной конвекции на теплообмен при течении жидкого металла в канале сложной формы, сопоставимой с элементарной ячейкой топливной сборки активной зоны ядерного реактора на быстрых нейтронах с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем. Установлено, что при малых скоростях теплоносителя и существенных тепловых потоках термогравитационная конвекция вносит свой вклад, и действующие зависимости в этой зоне не в полной мере описывают процессы теплообмена. На основании этого вывода была предложена эмпирическая формула, лучше всего соотносящаяся с экспериментальными данными в исследованной области режимных параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Говердовский А.А., Калякин С.Г., Рачков В.И. Альтернативные стратегии развития ядерной энергетики в XXI веке // Теплоэнергетика. 2014. №5. С. 3–10.
2. Адамов Е.О., Джалавян А.В., Лопаткин А.В., Молоканов Н.А., Муравьев Е.В., Орлов В.В., Калякин С.Г., Рачков В.И., Троянов В.М., Аврорин Е.Н., Иванов В.Б., Алексахин Р.М. Концептуальные положения стратегии развития ядерной энергетики России в перспективе до 2100 г. // Атомная энергия. 2012. Т. 112. № 6. С. 319–330.
3. Драгунов Ю.Г., Лемехов В.В., Моисеев А.В., Смирнов В.С. Реактор на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем (БРЕСТ) // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2015. № 3. С. 97–103.
4. Костычев П.И., Поддубный И.И., Пятницкая Н.Ю., Разуванов Н.Г., Свиридов Е.В. Особенности теплообмена при течении жидкого металла в вертикальном канале в компланарном магнитном поле // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2017. Т. 40. № 3. С. 68–77.

5. **Беляев И.А., Бирюков Д.А., Пятницкая Н.Ю., Разуванов Н.Г., Свиридов Е.В., Свиридов В.Г.** Техника сканирующих зондовых измерений полей температуры в потоке жидкости // Теплоэнергетика. 2019. № 6. С. 5–16.
6. **Кириллов П.Л., Жуков А.В., Логинов Н.И., Махин В.М., Пиоро И.Л., Юрьев Ю.С.** Справочник по тепло-гидравлическим расчетам в ядерной энергетике. Т. 2: Ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы. М.: ИздАТ, 2013. 685 с.
7. **Lyon R.N.** Liquid metal heat transfer coefficients // Chem. Eng. Prog. 1951. V. 47. N. 2. P. 75–79
8. **Субботин В.И., Ибрагимов М.Х., Номофилов Е.В.** Обобщающая зависимость коэффициента переноса тепла в потоке жидкости // ТВТ. 1965. Т. 3. № 3. С. 421–426.
9. **Кириллов П.Л., Ушаков П.А.** Теплообмен жидких металлов: особенности, методы исследований и основные зависимости // Теплоэнергетика. 2001. № 1. С. 49–56.
10. **Кириллов П.Л., Ушаков П.А.** Теплообмен жидких металлов в пучках стержней // Теплоэнергетика. 2001. № 2. С. 40–45.
11. **Hartnett J.P., Irvine T.F.** Nusselt values for estimating turbulent liquid metal heat transfer in noncircular ducts // AIChE Journal. 1957. V. 3, Issue 3. P. 313–317. <https://doi.org/10.1002/aic.690030305>

Research of the thermogravitational convection influence on heat exchange via the example of liquid metal flow through the active zone of a fast nuclear reactor

A.O. Novikov¹, N.G. Razuvanov², V.G. Sviridov¹

¹ *Moscow Power Engineering Institute (MPEI), Moscow, 112250, Russia*

² *Joint Institute for High Temperature of RAS, Moscow, 125412, Russia*
e-mail: sviridovvg@gmail.com; andnov92@mail.ru

The purpose of this experimental study is to obtain information on the distribution of wall temperature along the channel perimeter and heat transfer coefficients during the liquid metal coolant flow in models simulating of the fast reactor core elementary cell. The test area is a complex geometry formed by three sections of a round tube simulating the fuel elements which separate from each other by partitions. The experiments were carried out using RK-1 mercury loop located at the Department of Engineering Thermophysics, NRU «MPEI». The research was done with a probe technique: a swivel-type probe was used, which allows us measuring the required characteristic at any point of the studied channel cross-section, including on the wall. To determine the heat transfer coefficients, the values of the wall temperatures obtained at the moment of touching the thermocouple of the channel wall by the probe tip were used. In the experiments we used an automated scientific research system (ASRS), which provides a large amount of information in a short time. The article shows the results of experiments performed in a wide range of regime parameters (Gr, Re numbers). The generalization of the experimental data is presented as an empirical formula for the dependence of the Nusselt number on the Peclet number. The thermogravitational convection influence at low flow rates of liquid metal is reflected in the character of the Nusselt number dependence on the Richardson number and Peclet number. The obtained experimental data significantly extend the existing database for codes verification used to calculate the velocity and temperature fields in channels with a complex shape cross-section, simulating real cross-sections in which liquid metal coolant circulates, cooling the nuclear reactors core.

Keywords: nuclear reactor, experiment, probe method, thermogravitational convection, heat transfer, liquid metal.

REFERENCES

1. **Goverdovskii A.A., Kalyakin S.G., Rachkov V.I.** The alternative strategies of the development of the nuclear power industry in the 21st century. *Thermal Engineering*, 2014, vol. 61, no. 5, pp. 319–326.
2. **Adamov E.O., Dzhalavayan A.V., Lopatkin A.V., Molokanov N.A., Muravyov E.V., Orlov V.V., Kal'akin S.G., Rachkov V.I., Troyanov V.M., Avrorin E.N., Ivanov V.B., Aleksakhin R.M.** Conceptual framework of a strategy for the development of nuclear power in Russia to 2100. *Atomic Energy*, 2012, vol. 112, no. 6, pp. 391–403.
3. **Dragunov Yu.G., Lemekhov V.V., Moiseev A.V., Smirnov V.S.** Реактор на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем (BREST) [Lead cooled fast reactor (BREST)]. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii – Engineering and Automation Problems*, 2015, no. 3, pp. 97–103. In Russ.
4. **Kostychev P.V., Poddubnyi I.L., Pyatnickaya N.Yu., Razuvanov N.G., Sviridov E.V.** Osobennosti teploobmena pri techenii zhidkogo metalla v vertikal'nom kanale v komplanarnom magnitnom pole [Peculiarity of the heat transfer of liquid metal downward flow in vertical duct in coplanar magnetic field]. *Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Seriya:*

- Termoyadernyj sintez – Problems of Atomic Science and Technology, ser. Thermonuclear Fusion (PAS&T/TF)*, 2017, vol. 40, no. 3, pp. 68–77. In Russ.
5. **Belyaev I.A., Biryukov D.A., Pyatnitskaya N.Yu., Razuvanov N.G., Sviridov E.V., Sviridov V.G.** A technique for scanning probe measurement of temperature fields in a liquid flow. *Thermal Engineering*, 2019, vol. 66, no. 6, pp. 377–387.
 6. **Kirillov P.L., Zhukov A.V., Loginov N.I., Makhin V.M., Pioro I.L., Yuriev Yu.S.** *Spravochnik po teplogidravlicheskim raschetam v yadernoj ehnergetike. T. 2: Yadernye reaktory, teploobmenniki, parogeneratory* [Handbook of thermal hydraulic calculations in nuclear power. V. 2: Nuclear reactors, heat exchangers, steam generators]. Moscow: IzdAT, 2013. 685 p. In Russ.
 7. **Lyon R.N.** Liquid metal heat transfer coefficients. *Chem. Eng. Prog.* 1951. V. 47. N. 2. P. 75–79
 8. **Subbotin V.I., Ibragimov M.Kh., Nomofilov E.V.** Obobshhayushhaya zavisimost' koehffitsienta perenosa tepla v potoke zhidkosti [Summarizing the dependence of the heat transfer coefficient in the fluid flow]. *Teplofizika vysokikh temperatur – High Temperature*, 1964, vol. 3, no. 3, pp. 421–426. In Russ.
 9. **Kirillov P.L., Ushakov P.A.** Heat transfer to liquid metals: Specific features, methods of investigation, and main relationships. *Thermal Engineering*, 2001, vol. 48, no. 1, pp. 50–59.
 10. **Kirillov P.L., Ushakov P.A.** Liquid-metal heat transfer in rod bundles. *Thermal Engineering*, 2001, vol. 48, no. 2, pp. 127–133.
 11. **Hartnett J.P., Irvine T.F.** Nusselt values for estimating turbulent liquid metal heat transfer in noncircular ducts. *AIChE Journal*, 1957, vol. 3, no. 3, pp. 313–317. <https://doi.org/10.1002/aic.690030305>