

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ НА ТЕПЛООБМЕН В СВИНЦОВОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ

В.И. Белозеров, Э.Р. Ситдиков, Е.В. Варсеев

*Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ
249030, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, д. 1.*



Исследовалась одна из особенностей технологии тяжелых жидкометаллических теплоносителей, а именно, влияние примесей в пристенной области на теплообмен. Анализ накопленной теоретической базы по данной проблеме показал, что в более ранних исследованиях не учитывалось наличие примесей в тяжелых теплоносителях. Недавние экспериментальные данные по уточнению расчетных зависимостей теплообмена получились довольно противоречивыми. Тем не менее, предложено объяснение одному из наблюдаемых эффектов, повлиявших на экспериментальные данные (для условий нагрева теплоносителя). Приводится обобщение этих зависимостей. С использованием полученной зависимости было оценено влияние примесей при различных числах Пекле на теплообмен по сравнению с «чистыми» условиями.

Ключевые слова: свинцовый теплоноситель, тяжелый жидкометаллический теплоноситель, термодинамическая активность, кислород, теплообмен, теплоотдача, кольцевой канал, кольцевой зазор.

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Особенностью тяжелых жидкометаллических теплоносителей (ТЖМТ) является их достаточно высокая коррозионная активность по отношению к конструкционным материалам. В связи с этим главными задачами технологий, использующих свинецсодержащие ТЖМТ, является обеспечение коррозионной стойкости контактирующих с теплоносителем материалов. На сегодня основным методом защиты конструкционных материалов, контактирующих с ТЖМТ, является кислородная пассивация (ингибирование) поверхностей конструкционных материалов, которая заключается в формировании и поддержании на их поверхностях оксидных пленок. При наличии таких пленок коррозионная стойкость конструкционных материалов значительно возрастает. В силу оксидной природы защитных покрытий их состояние в процессе эксплуатации установки в значительной степени определяется кислородным режимом, т.е. уровнем термодинамической активности (ТДА) кислорода в теплоносителе [1].

Россия обладает значительным опытом разработки и эксплуатации установок с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями, а также ведет работы по созданию реакторных установок БРЕСТ и СВБР со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями соответственно.

Большой объем исследований жидкометаллических теплоносителей выполнен в 50-е – 70-е годы прошлого века, в особенности специалистами Физико-энергетичес-

© **В.И. Белозеров, Э.Р. Ситдиков, Е.В. Варсеев, 2016**

кого института под руководством академика В.И. Субботина. Исследования также проводились и за рубежом, в частности, О.Э. Двайером [4].

ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛООБМЕНА В ЖИДКИХ МЕТАЛЛАХ

В существующей литературе большинство зависимостей теплообмена получено теоретически или приводится для условий, когда количество примесей пренебрежимо мало. Большое внимание уделено теплоотдаче при течении жидкого металла в круглой трубе. Так в работах [7, 8] теоретически полученные формулы Мартинелли-Лайона и Себана-Шимазаки соответственно имеют следующий вид:

$$Nu = 7 + 0,025 \cdot Pe^{0,8}, \quad (1)$$

$$Nu = 5 + 0,025 \cdot Pe^{0,8}. \quad (2)$$

В.И. Субботиным и его коллегами был проведен ряд исследований по изучению жидкометаллических теплоносителей, результаты которых при $20 < Pe < 10^4$ описываются зависимостью [7, 9]

$$Nu = 4,36 + 0,025 \cdot Pe^{0,8}. \quad (3)$$

М.А. Михеевым с группой сотрудников была получена формула, которая при соблюдении высоких требований к чистоте металла имеет вид [9]

$$Nu = 4,8 + 0,014 \cdot Pe^{0,8} \quad \text{при } 40 < Pe < 3,2 \cdot 10^4, Re > 10^4. \quad (4)$$

При течении в трубах жидкого металла в условиях отсутствия специальных мер по тщательной очистке теплоносителя коэффициент теплоотдачи резко снижается и не соответствует расчетам по формулам (3), (4). Для подобных случаев в [9] приводятся формулы, предложенные М.А. Михеевым с сотрудниками или С.С. Кутателадзе и Б.М. Боришанским:

$$Nu = 3,4 + 0,014 \cdot Pe^{0,8} \quad (\text{для } 200 < Pe < 2 \cdot 10^4), \quad (5)$$

$$Nu = 5 + 0,0021 \cdot Pe^{0,8} \quad (\text{для } 100 < Pe < 2 \cdot 10^4). \quad (6)$$

Теплоотдача в кольцевых каналах исследована недостаточно, и, следовательно, нет надежных формул для этого случая. В работе [8] для расчета теплоотдачи в концентрических кольцевых зазорах при $d_2/d_1 = 1,05 - 2,0$ и $300 < Pe < 4000$ предлагаются следующие зависимости:

для одностороннего обогрева

$$Nu = 5 + 0,0021 \cdot Pe^{0,8} \quad (\text{для } 100 < Pe < 2 \cdot 10^4), \quad (6)$$

$$Nu = 6 + 0,02 \cdot Pe^{0,8} \pm 15\%; \quad (7)$$

для двустороннего обогрева

$$Nu_1 = 10 + 0,028 \cdot Pe^{0,8} \pm 20\%, \quad (8)$$

$$Nu_2 = 7,2 + 0,028 \cdot Pe^{0,8} \pm 20\%. \quad (9)$$

Выражения для определения характеристик теплообмена предполагают очень низкое содержание примесей в теплоносителе, которое практически не влияет на теплообмен.

Изложенное показывает целесообразность и необходимость проведения исследова-

дований теплообмена применительно к свинцовому теплоносителю в случаях отклонения от условий нормальной эксплуатации, а также в период и после аварийных ситуаций, связанных с существенным изменением содержания и физико-химического состояния примесей.

Для решения данной проблемы создаются специальные экспериментальные стенды с целью разработки (или уточнения) расчетных методик, расчетных формул теплообмена при контролируемом и регулируемом содержании примесей в контуре, прежде всего кислорода. Один из таких стендов был построен в Нижегородском государственном техническом университете [2, 3].

На этом стенде экспериментально были получены зависимости чисел Нуссельта от числа Пекле для свинцового и свинцово-висмутового теплоносителей. В связи с этим возникает необходимость обобщения экспериментальных данных для условий нагрева и охлаждения тяжелых теплоносителей, а также количественной оценки влияния примесей.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ТЕПЛОТДАЧЕ СВИНЦОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

На контактное термическое сопротивление оказывают влияние два фактора: наличие оксидных и других пленок на теплоотдающей поверхности и загрязнение самого теплоносителя окислами и другими примесями. В последнем случае важную роль играют взвешенные примеси, которые скапливаются вблизи теплоотдающих поверхностей, формируя контактное термическое сопротивление [10].

Многолетний опыт эксплуатации стендов ЯЭУ проектов 645, 705 и 705К показал, что ухудшение эксплуатационных свойств систем с тяжелыми жидкими металлами при превышении содержания примесей относительно нормированных значений проявляется в ухудшении эксплуатационных характеристик оборудования установки, включая активную зону реактора и контура в целом. Одни примеси (Al, Zn, Ag, Cu, Bi, Au, Hg и др) могут поступать в контур при первоначальном его заполнении вместе с самим теплоносителем, другие либо составляют основу конструкционных сталей и могут являться легирующими добавками (Fe, Cr, Ni и др), либо поступают от остального оборудования контура или извне. Примеси в зависимости от родства к кислороду находятся в окисленной форме и входят в состав сложных образований на основе оксида свинца или в виде раствора без образования твердых соединений [11].

В работах [2, 3] изучалась теплоотдача свинцового теплоносителя, протекающего в кольцевых зазорах. Авторы этих работ по исследованию процесса теплообмена в тяжелых теплоносителях (свинец, сплав свинец-висмут) получили необычные результаты, подчас противоречащие установившимся представлениям о поведении контактного термического сопротивления в зависимости от определяющих параметров и теплоотдачи от термического сопротивления. Это обусловило необходимость провести исследование полученных в работах [2, 3] результатов. В данной статье «чистыми» названы условия с низким содержанием примесей в теплоносителе, т.е. условия, в которых можно считать, что теплообмен подчиняется теоретическим зависимостям; остальные условия – «грязные».

Из рисунка 1 видно, что экспериментальные данные авторов [2, 3], описываемые кривыми 3, 4, демонстрируют более низкую теплоотдачу для меньшего содержания кислорода (см. термодинамические активности $A = 10^{-4} - 10^{-1}$ и $A = 10^{-5} - 10^{-4}$ для кривых 3, 4 соответственно); это относится также к кривым 5, 6 при $Pe \leq 1000$.

Возникает также вопрос об отсутствии влияния примеси кислорода на числа Nu в широком интервале изменения термодинамической активности: $A = 10^{-4} - 10^{-1}$ (кривая 3) и $A = 10^{-3} - 10^{-1}$ (кривая 6).

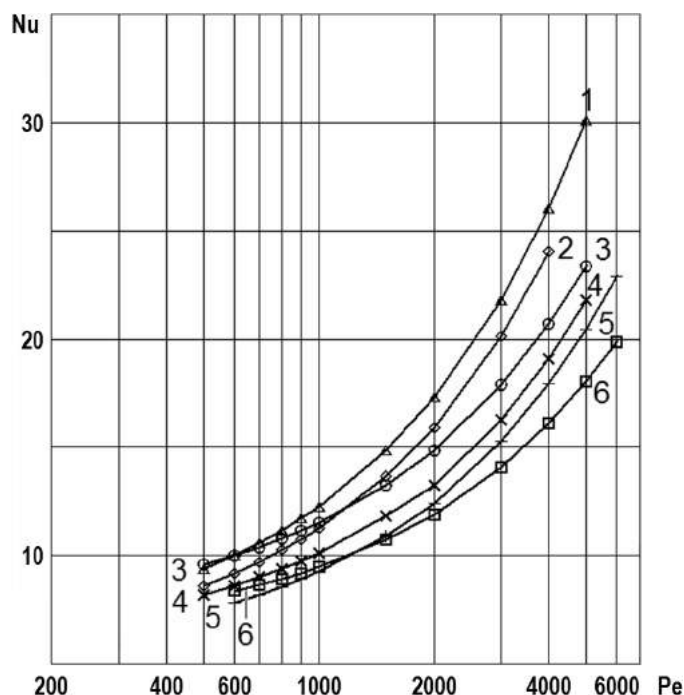


Рис. 1. Экспериментальные данные авторов [2, 3]:
 1 – $Nu = 5,5 + 0,027 \cdot Pe^{0,8}$, $d_1/d_2 = 4,2$; 2 – $Nu = 5 + 0,025 \cdot Pe^{0,8}$, $200 \leq Pe \leq 4000$;
 3 – $Nu = 7 + 0,018 \cdot Pe^{0,8}$, $500 \leq Pe \leq 5000$, $A = 10^{-4} - 10^{-1}$; 4 – $Nu = 5,6 + 0,018 \cdot Pe^{0,8}$, $500 \leq Pe \leq 5000$, $A = 10^{-5} - 10^{-4}$;
 5 – $Nu = 6,2 + 0,013 \cdot Pe^{0,8}$, $600 \leq Pe \leq 6000$, $A = 10^{-4} - 10^{-3}$; 6 – $Nu = 5 + 0,017 \cdot Pe^{0,8}$, $600 \leq Pe \leq 6000$, $A = 10^{-3} - 10^{-1}$

С увеличением числа Pe (скорости теплоносителя) по данным [2, 3] возрастает мера расхождения между значениями теплоотдачи для «чистых» и «грязных» условий. Например, для кривой 6 в сравнении с кривой 1 имеет место

$$\text{при } Pe = 500, Nu_1/Nu_6 = 1,2; \quad \text{при } Pe = 1000, Nu_1/Nu_6 = 1,3; \quad \text{при } Pe = 5000, Nu_1/Nu_6 = 1,67.$$

Подобного эффекта не наблюдалось в исследованиях контактного термического сопротивления другими авторами. Эффект авторами [2, 3] не разъясняется, но в первом приближении мы предполагаем, что при увеличении скорости потока свинца возможны два варианта дальнейших событий: 1) происходит срыв пристенной области; 2) происходит налипание примесей за счет того, что ядро потока ускорилось, а в пристенной области скорость изменилась незначительно (профиль скорости стал более выпуклым в центральной области потока), что, возможно, и произошло в указанном выше случае. Реализация первого или второго варианта, на наш взгляд, зависит от диаметра трубы.

ОБОБЩЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И СРАВНЕНИЕ С ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЗАВИСИМОСТЬЮ

Результаты большинства исследований теплообмена в жидких металлах описываются зависимостями, имеющими вид [7 – 9]

$$Nu = X + Y \cdot Pe^N \cdot Z, \tag{10}$$

где X, Y – константы; N – показатель степени; Z – функция геометрических характеристик.

Результаты экспериментов [2, 3] также имеют аналогичный вид записи. Так как влиянием примеси кислорода можно пренебречь по причине крайне низкой предельной растворимости кислорода в свинце, то для сравнения этих зависимостей с теор-

ретическими целесообразно их обобщить.

$$Nu = 7 + 0,018 \cdot Pe^{0,8}, \quad 500 \leq Pe \leq 5000, A = 10^{-4} - 10^{-1}; \quad (11)$$

$$Nu = 5,6 + 0,018 \cdot Pe^{0,8}, \quad 500 \leq Pe \leq 5000, A = 10^{-5} - 10^{-4}; \quad (12)$$

$$Nu = 6,2 + 0,013 \cdot Pe^{0,8}, \quad 600 \leq Pe \leq 6000, A = 10^{-4} - 10^{-3}; \quad (13)$$

$$Nu = 5 + 0,017 \cdot Pe^{0,8}, \quad 600 \leq Pe \leq 6000, A = 10^{-3} - 10^{-1}. \quad (14)$$

Аппроксимация экспериментальных данных одной кривой дает следующий результат:

$$Nu = 6 + 0,017 \cdot Pe^{0,8}, \quad 600 \leq Pe \leq 5000, A = 10^{-5} - 10^{-1}. \quad (15)$$

Для сравнения соотношений (15) и (2) положим, что с изменением числа Pe мера расхождения между значениями теплоотдачи для «чистых» и «грязных» условий остается неизменной и равной среднему арифметическому значению в исследованных интервалах чисел Pe .

Исходя из этих условий, для решеток твэлов, обтекаемых свинцом, следует уменьшить теплоотдачу по сравнению с «чистым» теплоносителем согласно следующим соображениям.

Формула для теплообмена в раздвинутых треугольных решетках твэлов ($s/d \geq 1,2$) имеет вид [5]

$$Nu_{ч \text{ твэл}} = Nu_{л} + B \cdot (s/d)^{-2} \cdot Pe^m, \quad (16)$$

где $Nu_{л} = 7,55 \cdot (s/d) - 20 \cdot (s/d)^{-13}$; $B = 0,041$; $m = 0,56 + 0,19 \cdot (s/d)$.

Считаем, что для кольцевого зазора и решеток твэлов справедливо соотношение

$$(Nu_{ч} / Nu_{г}) = (Nu_{ч} / Nu_{г})_{\text{твэл}}, \quad (17)$$

где индексы «ч» и «г» означают «чистый» и «грязный» соответственно.

Из (17) получаем

$$Nu_{г \text{ твэл}} = Nu_{г} \cdot Nu_{ч \text{ твэл}} / Nu_{ч}. \quad (18)$$

Анализируя таким способом при $s/d = 1,33$ и различных числах Пекле, получаем следующие результаты, которые сведены в табл. 1.

Таблица 1

Ухудшение теплообмена по сравнению с теоретической зависимостью (2) на основе выражения (15)

Pe = 600	Pe = 1000	Pe = 2000	Pe = 4000	Pe = 5000
4%	9%	16%	21%	24%

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В нашей стране имеется значительный опыт в области эксплуатации быстрых реакторов с натриевым теплоносителем. Повышение требований к безопасности и надежности ядерных реакторов возможно путем использования быстрых реакторов с ТЖМТ, которые обладают рядом преимуществ по сравнению с натриевыми реакторами. Однако остается проблемой необходимость учета влияния эксплуатационного содержания примесей в теплоносителе и контуре на характеристики теплообмена.

Анализ текущего состояния исследований влияния эксплуатационного содержания примесей в свинцовом теплоносителе и контуре на характеристики теплообмена указывает на их недостаточность для формирования рекомендаций по анализу возможных отклонений от нормальной эксплуатации в проектах реакторных установок со свинцовым теплоносителем. Авторами статьи в ходе анализа эксперимен-

тальных данных, представленных в работах [2, 3], было предложено объяснение эффектов, повлиявших на результаты.

Литература

1. Легких А.Ю., Мартынов П.Н., Асхадуллин Р.Ш., Симаков А.А.. Устройства для обеспечения заданного кислородного режима в первом контуре ЯЭУ с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем. / Материалы XIV Научно-технической конференции молодых специалистов, ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2012.
2. Безносков А.В., Новожилова О.О., Молодцов А.А. и др. *Характеристики теплообмена моделей поверхностей активной зоны и парогенератора при регулировании содержания примеси в контуре со свинцовым теплоносителем // Атомная энергия. – 2008. Т. 104, вып.2. – С. 74-80.*
3. Безносков А.В., Новожилова О.О., Савинов С.Ю. *Экспериментальные исследования процессов теплообмена и профилей температур потока тяжелого жидкометаллического теплоносителя. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – Обнинск, 2008. - №3. - С. 80-90.*
4. Dwyer O.E., Tu P.S. *Unlinear Heat Transfer to Liquid Metals Flowing in Annuli // Nuclear Science and Engineering. – 1963, 15. PP. 58-68.*
5. Жуков А.В. Теплогидравлический расчет реакторов. Ч. 3. Теплоотдача и температурные поля твэлов в регулярных решетках (однофазное течение: эксперимент-расчет, методики и формулы). Учебно-научная лаборатория ИАТЭ и ГНЦ РФ-ФЭИ. Изд. ОНТИ ГНЦ РФ-ФЭИ, Обнинск, 2006 г. Т. 1.
6. Белозеров В.И., Жуков А.В., Кузина Ю.А., Грунский С.О., Варсеев Е.В. О некоторых экспериментальных данных по изучению термодинамической активности кислорода в тяжелых теплоносителях. / Сб. статей конф. «Теплофизика -2010» ГНЦ РФ-ФЭИ, Обнинск, 2010. С. 69-71.
7. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача/ Уч. для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 416 с.
8. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы)/ Под ред. П.Л. Кириллова. – 2-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 360 с.
9. Рассохин Н.Г. Парогенераторные установки атомных электростанций. – М.: Атомиздат, 1980. -384 с.
10. Жуков А.В. Теплогидравлический расчет реакторов. Ч. 2. Конвективный теплообмен при однофазном течении (классические и современные представления и решения). Учебное пособие. - Обнинск, ГНЦ РФ-ФЭИ, 2003. -400 с.
11. Молодцов А.А. Характеристики теплообмена от свинцового теплоносителя в оборудовании ЯЭУ при эксплуатационном содержании в нем примесей / Дис. канд. техн. наук, Нижний Новгород, 2007.

Поступила в редакцию 13.11.2015 г.

Авторы

Белозеров Владимир Иванович, доцент, канд. техн. наук

E-mail: v.i.belozerov@iate.obninsk.ru

Ситдииков Эмиль Рустемович, магистр

E-mail: emilsitdikov@gmail.com

Варсеев Евгений Васильевич, аспирант

E-mail: eugeny.varseev@gmail.com

EFFECT OF IMPURITIES CONTENT ON THE HEAT TRANSFER IN THE LEAD COOLANT

Belozerov V.I., Sitdikov E.R., Varseev E.V.

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering
National Nuclear Research University «МФТИ»
1 Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249040 Russia

ABSTRACT

This paper presents research results of one of the features of heavy liquid metal technology, in particular the effect of impurities content on the heat exchange process. An analysis of the accumulated theoretical base regarding this problem was done. It shows that earlier researches did not take account of the presence of impurities (especially of oxygen).

To solve such problems in the Russian Federation are built special liquid metal test benches that obtain dependencies Nusselt numbers from Peclet numbers. The experimental results obtained on Nizhny Novgorod State Technical University test bench that refine earlier calculated dependencies are quite controversial. The main contradiction lay in the fact that dependencies of heat exchange in higher oxygen content conditions demonstrates better heat exchange than in the conditions in which the oxygen content is less. However, among the obtained experimental data (coolant heating conditions) there were formulas that satisfactorily describes heat transfer. The paper presents a generalization of these formulas into one, with the inclusion of the values of thermodynamic activity of oxygen into their record structure. To obtain it earlier heat transfer formulas were considered, in particular record structure of these formulas. Then, it was necessary to find constants included in the structure of the desired formula. The most convenient way was to use the graphical method. This method is that the curved lines of heat exchange were compared with each other taking into account the range of variation of thermodynamic activity of oxygen. Using obtained formula, we estimated the effect of different oxygen amounts at various Peclet numbers on heat transfer compared to the "clean" conditions.

Keywords: lead coolant, heavy liquid metal coolant, thermodynamic activity, oxygen, heat transfer, heat exchange, the annular channel, an annular gap.

REFERENCES

1. Legkih A.Yu., Martynov P.N., Ashadullin R.S., Simakov A.A. Ustrojstva dlya obespecheniya za-dannogo kislorodnogo rezhima v pervom konture YaEU s tyazhyolym zhidkometallicheskim teplonositelem [Oxygen regime appliances of the NPS primary loop with a heavy liquid metal coolant]. // Materialy XIV Nauchno-tehnicheskoy konferencii molodyh specialistov OKB «GIDROPRESS» [XIV Science and Technology conference abstracts OKB «GIDROPRESS»], 2012 (in Russian).
2. Beznosov A.V., Novozhilova O.O., Molodtsov A.A. Heat transfer characteristics of core surface models and the steam generator by adjusting the content of impurities in the lead coolant circuit. *Atomnaya energiya*. 2008., no.2, pp. 74-80 (in Russian).
3. Beznosov A.V., Novozhilova O.O., Savinov S.Y. Experimental research of heat transfer processes and temperature profiles of a flow of heavy liquid metal coolant]. *Izvestia vuzov. Yadernaya energetika*. 2008, no. 3, pp. 80-90 (in Russian).
4. Dwyer O.E., Tu P.S. Unlinear Heat Transfer to Liquid Metals Flowing in Annuli. *Nuclear Science and Engineering*. 1963, no. 15, pp. 58-68.
5. Zhukov A.V. Heathydraulic calculation of reactors. Part 3: Heat transfer and temperature fields of fuel rods in a regular lattice (single-phase flow: experiment, calculation, methods

and formulas). Obninsk. INPE and IPPE Educational and Research Laboratory, ONTI GNTs RF-FEI Publ., 2006 (in Russian).

6. Belozerov V.I., Zhukov A.V., Kuzina Y.A., Grunskiy S.O., Varseev E.V. About some experimental data on the thermodynamic activity of oxygen in heavy coolant. Collection of abstracts "Thermophysics-2010" IPPE. Obninsk, 2010, pp. 69-71 (in Russian).

7. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. Heat transfer. Textbook for universities. 4-th edition, revised and enlarged. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1981. 416 p. (in Russian).

8. Kirillov P.L., Yur'ev Y.S., Bobkov V.P. Heat hydraulic calculation manual (nuclear reactors, heat exchangers, steam generators). Ed. Kirillov P.L., 2-nd edition. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1990. 360 p. (in Russian).

9. Rassohin N.G. Steam generators of nuclear power plants. Moscow, Atomizdat Publ., 1980. 384 p. (in Russian).

10. Zhukov A.V. Thermal-hydraulic calculation of reactors. Part 2: Convective heat transfer for single-phase flow (classical and modern ideas and solutions). Obninsk, IPPE Publ., 2003. 400 p. (in Russian).

11. Molodcov A.A. Characteristics of heat transfer from the lead coolant in nuclear power equipment at the operational content of impurities. Cand. tech. sci. diss. Nizhnij Novgorod, 2007. 158 p. (in Russian).

Authors

Belozerov Vladimir Ivanovich, Assistant Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: v.i.belozerov@iate.obninsk.ru

Sitdikov Emil' Rustemovich, Magister

E-mail: emilsitdikov@gmail.com

Varseev Evgenij Vasil'evich, PhD Student

E-mail: eugeny.varseev@gmail.com