

УДК 621.039.58

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ
В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ТВС С ПОМОЩЬЮ ЯЧЕЙКОВОГО МОДУЛЯ CELSIST***Орлова Е.Е., Смирнов В.П. (АО «НИКИЭТ», г. Москва),**Власенко А.Е., Палагин А.В. (ИБРАЭ РАН, г. Москва)*

e-mail: vlasenko@ibrae.ac.ru

При проектировании реакторов с жидкометаллическим теплоносителем ключевой характеристикой является распределение температуры. Проектные ограничения касаются температуры топлива, оболочки и теплоносителя, поэтому точный расчет теплогидравлических характеристик ТВС активной зоны является необходимым условием обоснования безопасности реакторных установок.

В настоящей работе рассматривается ячейковый модуль CELSIST интегрального кода ЕВКЛИД/V2, предназначенный для стационарного и нестационарного теплогидравлического расчета режимов охлаждения ТВС жидкометаллическим теплоносителем, и приводятся результаты моделирования течения жидкометаллического теплоносителя в экспериментальных ТВС [1]. В кодах, использующих ячейковый подход, уравнения сохранения массы, импульса и энергии формулируются и решаются для продольных ячеек, на которые разбивается гидравлический канал [2—7]. Уравнения сохранения содержат дополнительные члены, описывающие обмен массой, импульсом и энергией между соседними ячейками, т.е. в поперечном направлении. Подобный подход позволяет дать более точное по сравнению с канальными кодами описание тепло- и массопереноса в ТВС, учитывающее поперечные неравномерности.

Ячейковый модуль CELSIST позволяет рассчитывать пространственное распределение температуры и скорости жидкометаллического теплоносителя, а также температуры твэлов в стационарном и нестационарном режимах течения в ТВС. Этот модуль является модификацией разработанного в 2009 г. в НИКИЭТе кода UNSCELM 1.0, ориентированного на разные однофазные теплоносители и типы ТВС [8]. Расчетная модель ТВС представляет собой систему теплогидравлически связанных между собой ячеек, ограниченных твэлами, обечайкой, каналами системы управления и защиты и несущими стержнями. Соседние ячейки контактируют между собой вдоль условных поверхнос-

тей (связей), которые их разделяют в поперечном сечении.

С помощью модуля CELSIST решается система нестационарных конечно-разностных уравнений сохранения массы, количества движения и энергии, записанных для средних значений в ячейках: уравнения неразрывности, переноса импульса в продольном и поперечном направлении и переноса тепловой энергии.

В рамках общей численной схемы также решается уравнение теплопроводности для твэлов. Для давления задаются краевые условия на входе и выходе из ТВС. Возможно также задание расхода теплоносителя на входе и давления на выходе из ТВС.

В расчетах учитываются зависимость коэффициентов гидравлического сопротивления дистанционирующих решеток от числа Рейнольдса, а также влияние проволоочной навивки на конвективное перемешивание. Допускается произвольная форма распределения энерговыделения по высоте и поперечному сечению ТВС.

Замыкающие соотношения для коэффициента гидравлического сопротивления ξ и числа Нуссельта Nu , характеризующего теплопередачу в ячейке, представлены в виде

$$\xi = \xi_0 \psi_\xi; \quad Nu = Nu_0 \psi_{Nu},$$

где ξ_0 , Nu_0 — коэффициент гидравлического сопротивления и число Нуссельта, определенные для регулярной (центральной) ячейки; ψ_ξ , ψ_{Nu} — факторы формы, учитывающие геометрические особенности угловых и боковых ячеек.

Соотношения для коэффициента трения ξ и числа Нуссельта Nu разбиты на четыре группы:

1. ТВС с квадратной упаковкой гладких твэлов с дистанционирующими решетками (число Нуссельта [9, 10], коэффициент трения [9, 11]):

$$\xi = \frac{64}{Re} [0,41 + 1,9(S - 1)] \psi_\xi \quad \text{при } Re \leq 2000;$$

$$\xi = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d_h} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25} \left\{ 0,59 + 0,19(S-1) + \right. \\ \left. + 0,52[1 - \exp(-10(S-1))] \right\} \psi_\xi \\ \text{при } \text{Re} > 2000;$$

$$\text{Nu} = \left[7,55S - 14S^{-5} + 0,007 \text{Pe}^{0,64+0,246S} \right] \chi \psi_{\text{Nu}},$$

2. ТВС с треугольной упаковкой твэлов с проволочной навивкой (число Нуссельта [9, 10], коэффициент трения [9, 12]):

$$\xi = \frac{64}{\text{Re}} (0,407 + 2\sqrt{S-1}) \left[1 + 17(S-1) \frac{1}{H} \right] \psi_\xi \\ \text{при } \text{Re} \leq 2000;$$

$$\xi = \frac{0,21}{\text{Re}^{0,25}} \times$$

$$\times \left\{ 1 + \frac{124 \text{Re}^{0,06}}{H^{1,65}} [1,78 + 1,485(S-1)](S-1) \right\} \psi_\xi \\ \text{при } \text{Re} > 2000;$$

$$\text{Nu} = \left(7,55S - \frac{20}{S^{13}} + 0,041 \frac{1}{S^2} \text{Pe}^{0,56+0,19S} \right) \chi \psi_{\text{Nu}},$$

3. ТВС с гладкими твэлами в треугольной упаковке с дистанционирующими решетками (число Нуссельта [9, 10], коэффициент трения [9, 13]):

$$\xi = \frac{64}{\text{Re}} (0,41 + 1,9(S-1)^{1/3}) \psi_\xi \text{ при } \text{Re} \leq 2000;$$

$$\xi = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d_h} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25} \times$$

$$\times \{ 0,57 + 0,18(S-1) + 0,53[1 - \exp(-B)] \} \psi_\xi;$$

$$B = 0,58 \{ 1 - \exp[-70(S-1)] \} + 9,2(S-1) \\ \text{при } \text{Re} > 2000;$$

$$\text{Nu} = \left(7,55S - \frac{20}{S^{13}} + 0,041 \frac{1}{S^2} \text{Pe}^{0,56+0,19S} \right) \chi \psi_{\text{Nu}},$$

4. ТВС с треугольной упаковкой твэлов и дистанционированием «ребро по ребру» (число Нуссельта [9, 10], коэффициент трения [9, 14]):

$$\xi = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d_h} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25} \{ 0,57 + 0,18(S-1) +$$

$$+ 0,53[1 - \exp(-B)] \} \left[1 + 600(S-1) \frac{1}{H^2} \right] \psi_\xi;$$

$$B = 0,58 \{ 1 - \exp[-70(S-1)] \} + 9,2(S-1);$$

$$\text{Nu} = \left(7,55S - \frac{20}{S^{13}} + 0,041 \frac{1}{S^2} \text{Pe}^{0,56+0,19S} \right) \chi \psi_{\text{Nu}}.$$

Формулы для коэффициента межканального переноса разбиты на три группы:

1. ТВС с гладкими твэлами с дистанционирующими решетками [9]:

$$\beta^M = \frac{F}{\Delta} \frac{1}{d} \left[10^{-2} S^{0,5} (\text{Re}/10^4)^{-0,2} + a_{\text{кон}} + \frac{6,7S}{S_2 \text{Re}} \right];$$

$$\beta^h = \frac{F}{\Delta} \frac{1}{d} \left[0,007(S-1)^{0,5} (\text{Re}/10^4)^{-0,2} + \right. \\ \left. + a_{\text{кон}} + \frac{6,7(S-1)}{S \text{Pe}} \right],$$

2. ТВС, дистанционируемая «ребро по ребру» [15]:

$$\beta^M = \frac{1}{3} \{ 3,75S - 0,564 - 3,186 \exp[-1100(S-1)^4] \} \times \\ \times [1,085 - 0,754 \exp(-0,132 \cdot 10^{-3} \text{Re})] \frac{F}{\Delta H d}; \\ \beta^h = 0,7\beta^M,$$

3. ТВС, дистанционируемая «ребро по оболочке» [16]:

$$\beta^M = \{ 2,75S - 3,57 \exp[-119,0(S-1)^{2,12} + 1] \} \times \\ \times [1,085 - 0,754 \exp(-132 \text{Re})] \frac{F}{\Delta H}; \\ \beta^h = 0,7\beta^M.$$

В приведенных соотношениях d — наружный диаметр твэла; Δ — длина границы раздела между соседними ячейками; Re — число Рейнольдса; Pe — число Пекле; $a_{\text{кон}}$ — конвективная составляющая, учитывающая случайные отклонения геометрии модельной сборки от идеальной; $H = h/d$ — относительный шаг навивки ребра; $S = s/d$ — относительный шаг упаковки твэлов.

При моделировании экспериментов, в которых твэлы дистанционируются с помощью проволочной навивки, используется корреляция «ребро по оболочке».

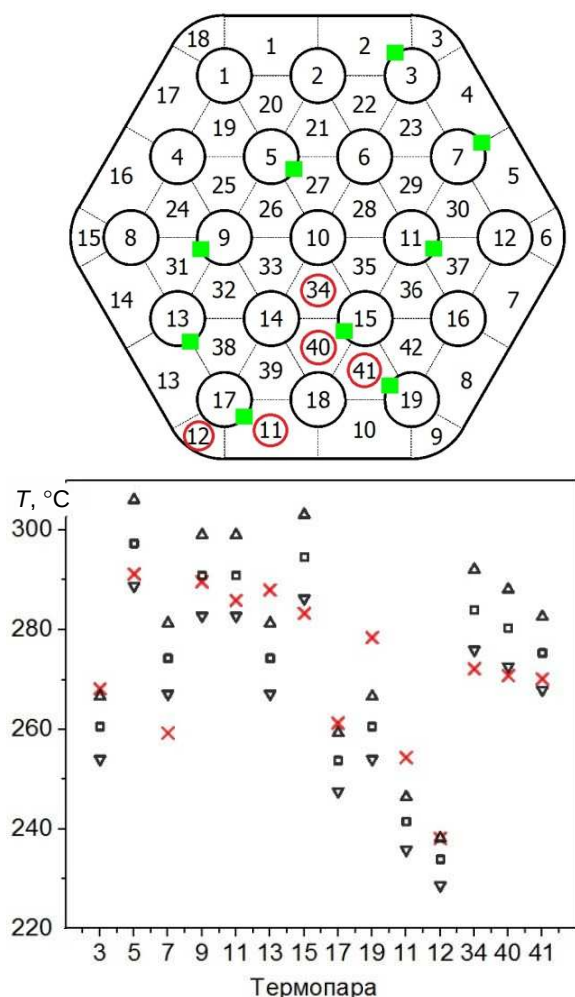
Система нестационарных конечно-разностных уравнений баланса массы, импульса и энергии решается методом SIMPLER, который является модификацией алгоритма SIMPLE, широко используемого в трехмерных CFD-кодах.

Моделирование экспериментов по течению эвтектического сплава свинец—висмут в модельной ТВС на установке THEADES (Германия) [17]. Геометрические параметры ТВС: шестигранный чехол, 19 стержней, треугольная решетка, диаметр стержня 8,2 мм, шаг решетки 10,49 мм, площадь сечения ТВС 1027,3 мм², общая длина стержней 2229 мм, обогреваемая длина 870 мм. Дистанционирование проводилось с помощью проволоочной навивки, диаметр проволоки 2,2 мм, шаг навивки 328 мм. В моделируемом эксперименте температура теплоносителя на входе в сборку составляла 200 °С, массовый расход 19,18 кг/с, тепловая мощность 197,01 кВт.

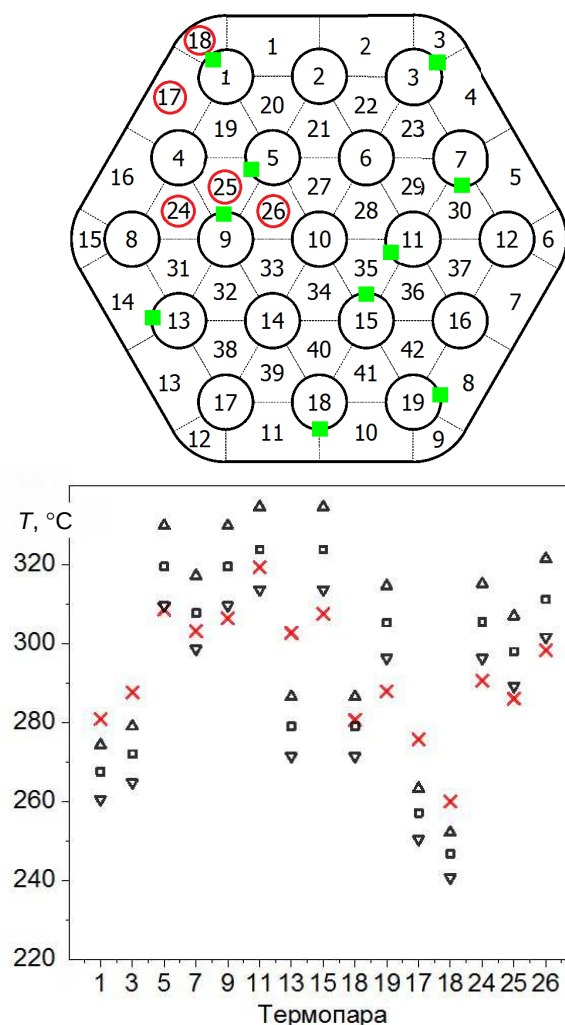
Были проведены многовариантные расчеты с варьированием расхода и температуры тепло-

носителя на входе в сборку и мощности. Проведено сравнение минимальной, средней и максимальной расчетной и измеренной температуры для сечения ML2 и ML3 (рис. 1, 2). Среднее относительное отклонение расчетной температуры от экспериментальной составило 9 и 10% для сечения ML2 и ML3 соответственно.

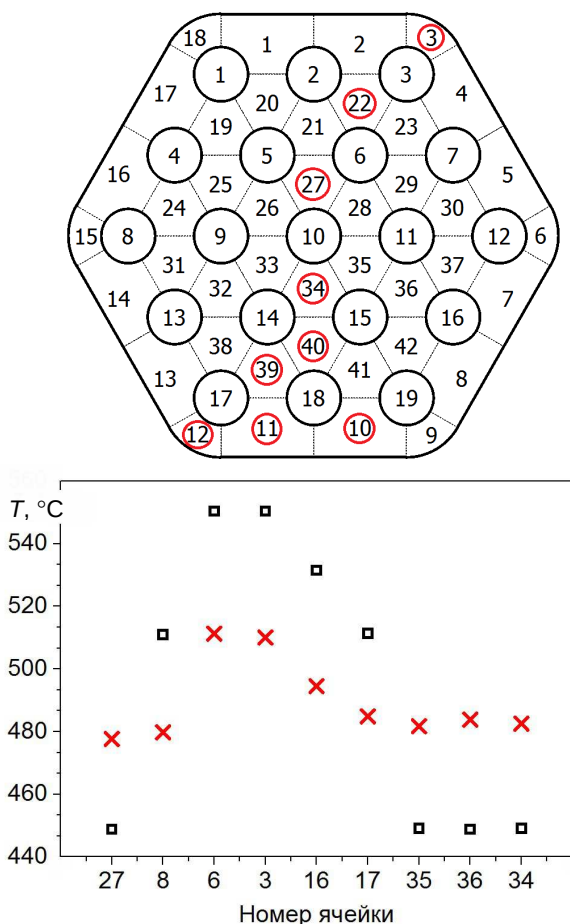
Моделирование экспериментов по течению натрия в модельной ТВС на установке FFM Bundle 2A (США) [18, 19]. Геометрические параметры ТВС: шестигранный чехол, 19 стержней, треугольная решетка, диаметр стержня 5,84 мм, шаг решетки 7,26 мм, площадь сечения ТВС 531,3 мм², общая длина стержней 914,4 мм, обогреваемая длина 533,4 мм. Дистанционирование проводилось с помощью проволоочной навивки, диаметр проволоки 1,422 мм, шаг навивки 304,8 мм. В моделируемом экспе-



Р и с. 1. Минимальная (∇), средняя ($\square$), максимальная расчетная (Δ) и измеренная температура ($\times$) теплоносителя и оболочек стержней с указанием положения термодпар в сечении ML2 (1,4253 м от входа в ТВС): ■ — термодпары 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19 в оболочках твэлов; ○ — термодпары 11, 12, 34, 40, 41 в центре оболочек



Р и с. 2. То же, что на рис. 1, в сечении ML3 (1,644 м от входа в ТВС): ■ — термодпары 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 18, 19 в оболочках твэлов; ○ — термодпары 17, 18, 24, 25, 26 в центре ячеек

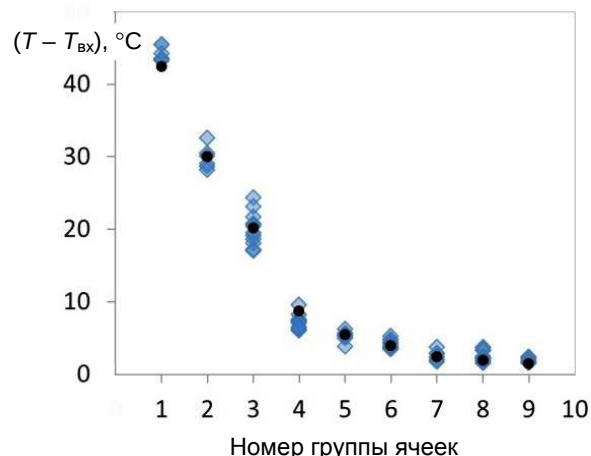


Р и с. 3. Расчетная ($\square$) и измеренная температура ($\times$) с указанием положения термопар в ячейках ($\circ$)

рименте температура теплоносителя на входе в сборку составляла $328,6^\circ\text{C}$, расход $0,284\text{ кг/с}$, тепловая мощность $59,03\text{ кВт}$.

Температура измерялась термопарами в сечении, расположенном на высоте 457 мм от начала обогреваемого участка. Проведено сравнение расчетной и измеренной температуры (рис. 3). Среднее относительное отклонение расчетной температуры от экспериментальной составило 19% .

Моделирование экспериментов по течению эвтектического сплава натрий—калий на стенде 6Б в АО «ГНЦ РФ — ФЭИ» (Россия) [20]. Геометрические параметры модельной сборки: шестигранный чехол, 37 стержней, треугольная решетка, диаметр стержня 16 мм , относительный шаг решетки $1,28$, обогреваемая длина 1810 мм , 4 дистанционирующие решетки. Температура теплоносителя на выходе из пучка стержней измерялась во всех ячейках с помощью 77 термопар. В моделируемом экспери-



Р и с. 4. Расчетная ($\diamond$) и измеренная температура ($\bullet$) в зависимости от номера группы ячеек

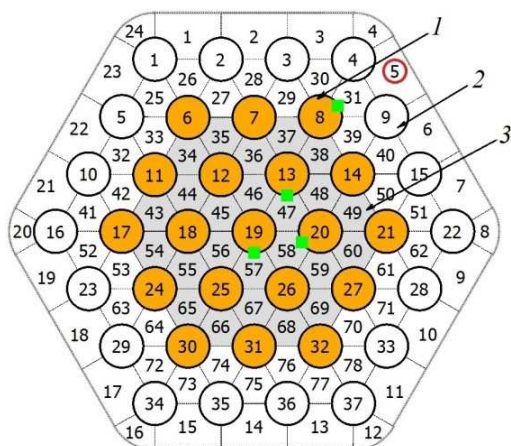
менте нагревались семь центральных стержней. Температура сплава на входе в сборку составляла $51,18^\circ\text{C}$, расход $2,53\text{ кг/с}$, тепловая мощность стержня $4,03\text{ кВт}$.

Было проведено сравнение расчетной и экспериментальной температуры, среднее относительное отклонение составило $2,8\%$ (рис. 4).

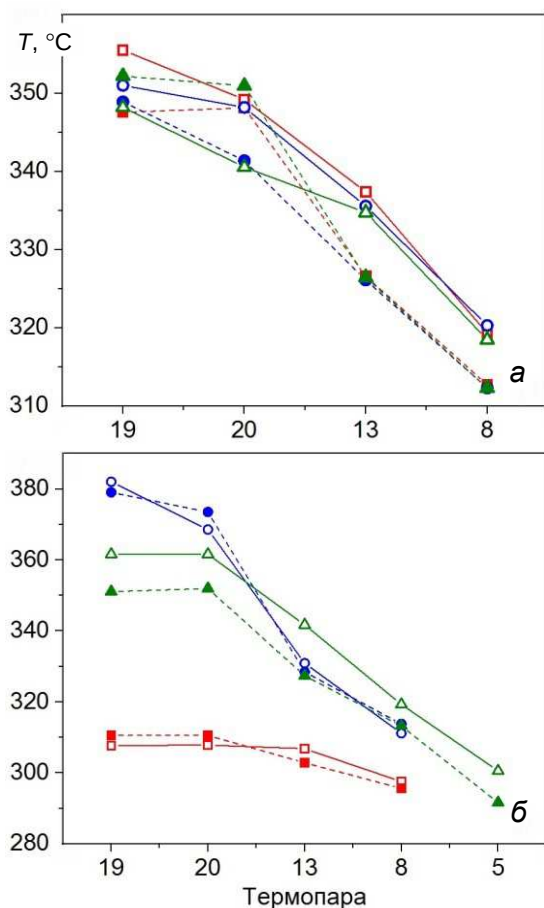
Моделирование экспериментов по течению натриевого теплоносителя в 37-твэльной сборке с частичной блокировкой проходного сечения (Япония) [21, 22]. Рабочий участок экспериментальной установки представляет собой модельную сборку с дистанционированием стержней решетками. Геометрические характеристики ТВС: треугольная решетка, диаметр стержня $6,5\text{ мм}$, шаг решетки $7,9\text{ мм}$, площадь сечения ТВС $971,2\text{ мм}^2$, общая длина стержней 1196 мм , обогреваемая длина 406 мм .

В моделируемом эксперименте использовалась центральная блокировка сечения (27% общей площади). Блокада представляла собой пластину из коррозионно-стойкой стали толщиной 5 мм , расположенную под одной из дистанционирующих решеток. При этом тепловыделение наблюдали только в 19 центральных стержнях, относящихся к зоне блокировки (рис. 5). Температура натрия на входе в сборку составляла $285,2^\circ\text{C}$, расход $3,03\text{ кг/с}$, тепловая мощность $97,98\text{ кВт}$.

Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными показано на рис. 6. Среднее относительное отклонение расчетной температуры от измеренной составило 13% .



Р и с. 5. Центральная блокировка сечения ТВС и расположение термопар: 1, 2, 3 — стержни с тепловыделением, без тепловыделения и с блокировкой соответственно; ■, ○ — термопара в оболочке твэла и в центре ячейки соответственно



Р и с. 6. Расчетная (■, ●, ▲) и измеренная температура (□, ○, △) на удалении 32, 52, 82 (а) и 168, 12, 22 мм (б) от блокировки сечения: 19, 20, 13, 8 — термопары в оболочках твэлов; 5 — термопара в центре ячейки

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мосунова Н.А. Интегральный код ЕВКЛИД/V1 для обоснования безопасности реакторных установок на

быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем. Ч. 1. Базовые модели. — Теплоэнергетика, 2018, № 5, с. 69—84.

2. Fricano J. Integrated Fuel Performance and Thermal-Hydraulic Subchannel Models for Analysis of Sodium Fast Reactors (Ph.D. Thesis). USA, MIT, 2012.

3. Liu X., Scarpelli N. Development of sub-channel code for liquid metal cooled fuel assembly. — Ann. Nucl. Energy, 2015, № 77, p. 425—435.

4. Kim W., Kim Y., Kim Y. A subchannel analysis code MATRA-LMR for wire wrapped LMR subassembly. — Ibid., 2001, № 29, p. 303—321.

5. Lodi F., Grasso G., Mattioli D., Sumini M. ANTEO+: a subchannel code for thermal-hydraulic analysis of liquid metal cooled systems. — Nucl. Engng Des., 2016, v. 301, p. 128—152.

6. Богословская Г.П., Кириллов П.Л., Сорокин А.П. Программа МИФ теплогидравлического расчета активной зоны реактора, охлаждаемого водой при сверхкритическом давлении. — Теплоэнергетика, 2009, № 3, с. 34—37.

7. Кузнецов И.А., Поплавский В.М. Безопасность АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. М.: ИздАт, 2012. 632 с.

8. Афонин С.Ю., Папандин М.В., Смирнов В.П., Тутукин А.В. Нестационарный теплогидравлический код UNSCELM. — Атомная энергия, 2012, т. 112, вып. 5, с. 260—263. // Afonin S.Yu., Papandin M.V., Smirnov V.P., Tutukin A.V. Nonstationary thermohydraulic code — UNSCELM. — Atomic Energy, 2012, v. 112, № 5, p. 318—322.

9. Кириллов П.Л., Бобков В.П., Жуков А.В., Юрьев Ю.С. Справочник по теплогидравлическим расчетам. Т. 1. Теплогидравлические процессы в ЯЭУ. М.: ИздАт, 2010.

10. Жуков А.В., Кузина Ю.А., Сорокин А.П. и др. Экспериментальное изучение на моделях теплообмена в активной зоне реактора БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым охлаждением. — Теплоэнергетика, 2002, № 3, с. 2—10.

11. Субботин В.И., Ибрагимов М.Х., Ушаков П.А. и др. Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках (основы расчета). М.: Атомиздат, 1975. 406 с.

12. Жуков А.В., Сорокин А.П., Титов П.А. и др. Анализ гидравлического сопротивления пучков твэлов быстрых реакторов. — Атомная энергия, 1986, т. 60, вып. 5, с. 317—321.

13. Альтшуль А.Д., Животовский Л.С., Иванов Л.П. Гидравлика и аэродинамика. М.: Стройиздат, 1987.

14. Субботин В.И., Габрианович Б.Н., Шейнина А.В. Гидравлические сопротивления при продольном обтекании гладких и оребренных пучков стержней. — Атомная энергия, 1972, т. 33, вып. 5, с. 889—892.

15. Жуков А.В., Сорокин А.П., Кириллов П.Л. и др. Методические указания и рекомендации по теплогидравлическому расчету активных зон быстрых реакторов. РТМ 1604.008. ГКИАЭ, ФЭИ, 1988.

16. Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М. Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1989.

17. **Pacio J., Daubner M., Fellmoser F. e.a.** Experimental study of heavy-liquid metal (LBE) flow and heat transfer along a hexagonal 19-rod bundle with wire spacers. — Nucl. Engng Des., 2016, № 301, p. 111—127.
18. **Fontana M., MacPherson R., Gnadt P. e.a.** Temperature Distribution in a 19-Rod Simulated LMFBR Fuel Assembly in a Hexagonal Duct (Fuel Failure Mockup Bundle 2A). Record of Experimental Data. ORNL, 1973.
19. **Fontana M., MacPherson R., Gnadt P. e.a.** Temperature distribution in the duct wall and at the exit of a 19-rod simulated LMFBR fuel assembly (FFM Budle 2A). — Nucl. Techn., 1974, № 24, p. 176—200.
20. **Кузина Ю.А., Привезенцев В.В., Сорокин А.П. и др.** Исследование температурных полей и полей теплоотдачи в модельных ТВС реактора с тяжелым теплоносителем (однородная геометрия). — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-реакторные константы, 2017, № 4, с. 15—23.
21. **Kikuchi Y., Ogino T., Ozaki Y. e.a.** Temperature, flow and acoustic noises in a locally blocked 37-pin bundle. — In: 7th Liquid Metal Boiling Working Group Meeting. Petten, 1977.
22. **Uotani M., Haga K., Kikuchi Y. e.a.** Local flow blockage experiments in 37-pin sodium cooled bundles with grid spacers. — In: 8th Liquid Metal Boiling Working Group Meeting. Mol, Belgium, 1978.

Поступила в Редакцию 30.09.19

УДК 621.039.548

ВОЗМОЖНОСТЬ ОБЛУЧЕНИЯ В РОССИЙСКИХ БЫСТРЫХ РЕАКТОРАХ РЕЦИКЛИРОВАННОГО ИЗ СМЕШАННОГО УРАН-ПЛУТОНИЕВОГО ТОПЛИВА ПЛУТОНИЯ, ИЗГОТОВЛЕННОГО В МАРКУЛЕ (ФРАНЦИЯ)

*Камарка Н., Сеттимо Д., Дэдден Ж.-Ф., Лемасон Д., Дюбюиссон П., Мигирдичан М. (EdF, Франция),
Ге А., Мулинэ М.-Э. (СЕА, Франция),
Беззубцев В.С., Троянов В.М. (АО «Концерн Росэнергоатом», Россия)
e-mail: troyanov@mail.ru*

Основанием настоящей работы является многолетнее двухстороннее научно-техническое сотрудничество Франции и России в области атомной энергии, оформленное межправительственными соглашениями и документами разного уровня. В рамках собственных научно-технических программ, выполняемых компаниями EdF и СЕА Франции, в течение последнего десятилетия неоднократно рассматривалась возможность облучения твэлов с рециклированным плутонием в российских быстрых реакторах БОР-60 и БН-600. Задачами являются облучение и исследование экспериментальных твэлов, которые содержат плутоний, извлеченный после переработки облученного в PWR уранового оксидного и смешанного уран-плутониевого топлива. В 2017 г. изготовление полной экспериментальной ТВС для БН-600 было расценено как слишком дорогое для EdF. Поэтому был предложен менее амбициозный эксперимент с использованием той же геометрии таблеток, которая предполагалась к использованию в реакторе ASTRID (Франция), и нескольких десятков граммов рециклированного плутония, извлеченного из облученных в PWR твэлов со смешанным топливом и переработанных в лаборатории Atalante (CEA) [1]. Технические возможности

проведения такого эксперимента обсуждаются в настоящей статье.

На первой фазе проекта укороченные твэлы, изготовленные в Маркуле (Франция), будут облучены в реакторе БОР-60. Максимальная масса оксида плутония в эксперименте № 1 составит около 65—70 г. Изотопный состав исходного плутония в начале облучения будет соответствовать следующему, %: ^{238}Pu 4,02, ^{239}Pu 37,88, ^{240}Pu 33,48, ^{241}Pu 11,42, ^{242}Pu 12,04, ^{241}Am 1,16. Поскольку плутоний будет извлечен из специально изготовленных твэлов, конечный изотопный состав будет незначительно отличаться. Содержание плутония в топливных таблетках, определенное по формуле $(\text{Pu} + \text{Am})/(\text{U} + \text{Pu} + \text{Am})$, будет немного меньше 28% и рассчитано на плотность теплового потока в БОР-60 42—45 кВт/м.

На стадии НИОКР будут протестированы разные химические процессы и технологии сепарации, конверсии и изготовления таблеток со смешанным уран-плутониевым топливом, которые будут использоваться на французских заводах топливного цикла будущего: переработка и изготовление смешанного топлива после 2060 г. Исследования будут проводиться сначала с использованием плутония, выделенного из оксид-