

9. Костин В.И., Кодочигов Н.Г. На пути к атомно-водородной энергетике. — Атомная стратегия, 2006, № 24, с. 20—21.
10. Лейпунский А.И. Состояние перспективы развития быстрых реакторов. — Атомная энергия, 1970, т. 28, вып. 4, с. 297—302.
11. Зинн В. Энергетические реакторы на быстрых нейтронах. — В сб.: Межд. конф. по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1958, т. 3, доклад P/814. М.: Атомиздат, 1958.
12. Громов Б.Ф., Тошинский Г.И., Чекунов В.В. и др. Создание РУ со свинцово-висмутовым теплоносителем для АПЛ. Краткая история. Обобщенные итоги эксплуатации. — В сб.: Тяжелые жидкометаллические теплоносители. Обнинск, 1999, т. 1, с. 14—17.
13. Громов Б.Ф., Григорьев О.Г., Дедуль А.В. и др. Анализ опыта эксплуатации установок с теплоносителем свинец—висмут и имевших место аварий. Обобщенные итоги. — Там же, с. 63—69.
14. Митенков Ф.М. Опыт создания и эксплуатации оборудования РУ ОК-550. — Там же, с. 84—87.
15. Rubbia C. CERN Concept of ADS. Techn. Com. Meeting. IAEA-TC-9033. Madrid, Spain, 17—19 Sept., 1997.
16. Independent Evaluation of the MYRRHA Project. OECD/NEA № 6881, 2009.
17. Orlov V.V., Sila-Novitsky A.G., Smirnov V.S. e.a. Lead-cooled reactor core, its characteristics and features. — In: Proc. Top. Meeting ARS-94. Pittsburgh, USA, v. 1, p. 516—523.
18. Wider H., Carlsson J., Loewen E. Renewed interest in lead cooled fast reactors. — Progress in Nucl. Energy, 2005, v. 47, № 1—4, p. 44—52.
19. Wider H., Carlsson J., Dietze K. e.a. Heavy-Metal Cooled Reactors. GLOBAL-03, USA, 2003.
20. Venneri F. ATW Non-Aqueous System Target-Blanket. Joint Russian—US Sem. on Transmutation. Moscow, 10—13 Nov. 1992.

Поступила в Редакцию 16.01.18

УДК 621.039

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ТВС РЕАКТОРОВ С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ ПРИ ЧАСТИЧНОЙ БЛОКИРОВКЕ ПРОХОДНОГО СЕЧЕНИЯ

*Корсун А.С., Меринов И.Г., Харитонов В.С. (НИЯУ МИФИ, г. Москва),
Чуданов В.В., Аксенова А.Е., Первичко В.А. (ИБРАЭ РАН, г. Москва)*

Для обоснования теплогидравлических характеристик ядерных энергетических установок (ЯЭУ) и анализа их поведения в переходных процессах и аварийных ситуациях используются как системные, так и универсальные термодинамические CFD-коды [1]. Особенностью расчета теплогидравлических процессов в ЯЭУ является использование подходов разного уровня (масштаба) моделирования. Для описания трехмерных процессов тепло- и массопереноса в активной зоне и теплообменных устройствах ЯЭУ в качестве такого подхода возможно использование модели пористого тела, позволяющей заметно сократить затраты ресурсов ЭВМ за счет существенного уменьшения числа элементов разбиения по сравнению с решением не усредненных по пространству уравнений гидродинамики. Поэтому модель пористого тела является частью большинства CFD-кодов.

Следует отметить, что приближение модели пористого тела в CFD-кодах, как правило, реализуется на основе подхода, разработанного для изотропных пористых сред. Однако ТВС и трубные пучки теплообменников являются ориентированными стержневыми структурами,

применительно к которым необходимо использовать модель анизотропного пористого тела, основанную на последних разработках в области теории пористого тела [2, 3]. В рамках этой модели трехмерный тепломассоперенос в ТВС описывается математически строго, анизотропия переноса учитывается с помощью тензорных величин силы сопротивления, эффективной вязкости и теплопроводности, для определения компонентов которых предложена интегральная модель турбулентности [4]. Интегральная модель турбулентности позволяет определять коэффициенты модели анизотропного пористого тела при обтекании различных стержневых сборок под произвольным углом, а также обоснованно применять эту методику для расчета нестационарных трехмерных процессов переноса. Подход анизотропного пористого тела вместе с интегральной моделью турбулентности реализован в программном модуле APMod.

Для проверки качества моделирования с помощью программного модуля процессов, сопровождающихся существенными поперечными перетечками теплоносителя, были выполнены расчетные исследования трехмерных теплофи-

зических процессов в ТВС реакторов с жидко-металлическим теплоносителем при частичной блокировке их проходного сечения. Блокировки рассматриваются как потенциально опасные источники аварийных ситуаций в ядерных реакторах, и исследованию гидродинамики и теплообмена в ТВС с заблокированной частью проходного сечения уделяется большое внимание. Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными данными, полученными на 169-стержневой сборке реактора SNR-300 (Германия), а также с расчетами с помощью прямого численного моделирования (DNS) кода CONV-3D для модельной сборки реактора БРЕСТ [5].

Модель анизотропного пористого тела совместно с интегральной моделью турбулентности. Уравнения трехмерного тепло-массопереноса в данном приближении получены [2—4] путем интегрирования по ячейке периодичности рассматриваемой сборки уравнений Навье—Стокса для несжимаемой жидкости совместно с уравнением сохранения энергии:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \phi u_j = 0, \quad i = 1, 2, 3; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau} \rho \phi u_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho \phi u_j u_i = \rho \phi g_i - k_{ij} u_j - \frac{\partial \phi P}{\partial x_i} + \\ + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu_{\text{эф}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); \end{aligned} \quad (2)$$

$$\rho c_p \phi \frac{\partial t}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho c_p \phi u_j t = \phi q_v + \frac{\partial}{\partial x_j} \lambda_{ij}^{\text{эф}} \frac{\partial t}{\partial x_i}. \quad (3)$$

Здесь ϕ — пористость сборки по теплоносителю; u_n — проекция вектора $\mathbf{u}$ на $\mathbf{n}$; ρ — плотность; g_i — компоненты вектора ускорения свободного падения; $k_{ij} = k_{\xi\xi} \delta_{ij} + (k_{\eta\eta} - k_{\xi\xi}) n_i n_j$ — компоненты тензора сопротивления; $k_{\eta\eta}(\beta)$, $k_{\xi\xi}(\beta)$ — главные компоненты тензора в направлении вдоль и поперек стержней; $\beta = \cos^2 \varphi \equiv u_n^2 / u^2$; φ — угол между вектором средней скорости $\mathbf{u}$ и единичным вектором $\mathbf{n}$, направленным вдоль оси стержней; $P = p + \rho c u^2$ — эффективное давление в потоке, являющееся суммой термодинамического давления и давления за счет турбулентных пульсаций и скоростей отклонения; $\mu_{\text{эф}}$ — эффективная вяз-

кость потока теплоносителя; c — коэффициент давления; c_p — удельная теплоемкость; q_v — объемное энергосодержание в жидкости, которым моделируется теплоприток от твердого тела; $\lambda_{ij}^{\text{эф}}$ — компоненты тензора эффективной теплопроводности теплоносителя.

Компоненты тензора сопротивления рассчитываются по экспериментальным зависимостям коэффициентов гидравлического сопротивления при продольном и поперечном обтекании пучков стержней [6], эффективные коэффициенты переноса энергии и импульса — через среднее по объему ячейки усреднение кинематической турбулентной вязкости $^{\text{яч}} \nu_t$ по формулам [2]

$$\lambda_{ij}^{\text{эф}} = \left[\left(\lambda + \rho c_p \frac{^{\text{яч}} \nu_t}{Pr_t} \right) (\phi - \phi_1) + \lambda^{\text{ст}} \right] \delta_{ij} + \quad (4)$$

$$\begin{aligned} + \left[\left(\lambda + \rho c_p \frac{^{\text{яч}} \nu_t}{Pr_t} \right) \phi_1 - \lambda^{\text{ст}} \right] n_i n_j; \\ \mu_{\text{эф}} = ^{\text{яч}} \nu_t (\phi - \phi_1) \rho. \end{aligned} \quad (5)$$

В выражениях (4), (5) λ , $\lambda^{\text{ст}}$ — коэффициент теплопроводности теплоносителя и твэлов соответственно; ϕ_1 — пористость сборки по теплоносителю при плотной упаковке твэлов; Pr_t — турбулентное число Прандтля; величина $^{\text{яч}} \nu_t$ определяется с помощью интегральной модели турбулентности; n_i — компоненты единичного вектора, ориентированного вдоль оси твэлов.

Уравнения интегральной модели турбулентности получены усреднением уравнений k — ε -модели турбулентности:

$$\phi \frac{\partial}{\partial \tau} k + u_j \frac{\partial}{\partial x_j} \phi k = \frac{\partial}{\partial x_j} a^k \frac{\partial k}{\partial x_j} + P_u + P_d - \phi \varepsilon; \quad (6)$$

$$\phi \frac{\partial}{\partial \tau} \varepsilon + u_j \frac{\partial}{\partial x_j} \phi \varepsilon = \frac{\partial}{\partial x_j} a_j^\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} + C_\varepsilon \frac{\varepsilon}{k} [P_u + P_d - \phi \varepsilon], \quad (7)$$

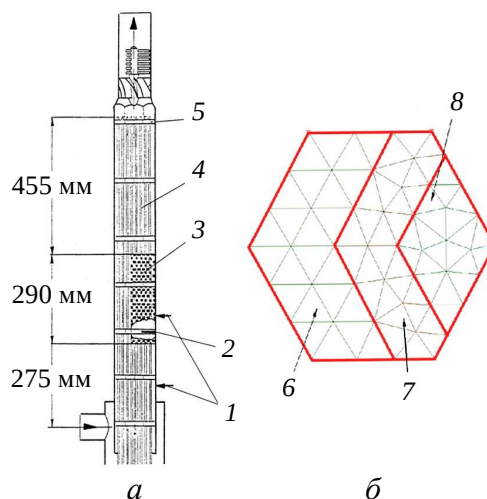
где k , ε — средняя по ячейке периодичности структуры кинетическая энергия турбулентности и скорость ее диссипации соответственно; a^k , a^ε — эффективный коэффициент диффузионного переноса энергии турбулентности и скорости ее диссипации; P_u , P_d — порождение турбулентности за счет усредненного движения и скоростей отклонения; коэффициент C_ε принимается равным 1,44.

Для уравнений движения (1), (2) в качестве граничных условий задаются распределение скорости на входе в пористую структуру и давление на выходе. На боковых поверхностях пористой структуры задаются условия проскальзывания. По температуре для уравнения сохранения энергии (3), кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации для уравнений модели турбулентности (6), (7) на входе задаются граничные условия первого рода, на выходе — нулевой поток. При этом на твердых границах пористой структуры задаются нулевые характеристики турбулентности, а также градиента температуры.

Для численного решения системы уравнений (1)—(3), (6), (7) используется метод конечных элементов. Программный модуль ARMod написан на языке C++ с использованием средств пакета FEniCS [7]. На каждом временном шаге последовательно решаются системы алгебраических уравнений для скорости и давления, температуры, параметров турбулентности. Все члены уравнений записываются на текущем временном слое. Линеаризация систем уравнений выполняется методом простых итераций. Решение полученных систем линейных уравнений находится итерационно стабилизированным методом бисопряженных градиентов (один из вариантов проекционных методов Крылова) с использованием блочного переобусловливателя Якоби.

Моделирование экспериментальной ТВС реактора SNR-300. Эксперименты [8] выполняли на экспериментальной установке KNS-Test для исследования температуры в электрообогреваемой сборке гладких стержней, омываемых натриевым теплоносителем, при частичной блокировке проходного сечения. По конструкции она соответствовала сборке быстрого реактора с натриевым теплоносителем SNR-300.

Сборка представляла собой пучок из 169 твэлов (рис. 1, а) диаметром 6 мм — 90 из них необогреваемые, охлаждаемых потоком жидкого натрия, в треугольной упаковке с шагом 7,9 мм. Высота обогреваемого участка 290 мм. Блокировка проходного сечения толщиной 5 мм располагалась на расстоянии 40 мм от начала зоны энерговыделения. Непроницаемая угловая блокировка занимала 21% проходного сечения (ячейки вокруг 36 твэлов). Скорость теплоносителя на входе в экспериментальный участок со-



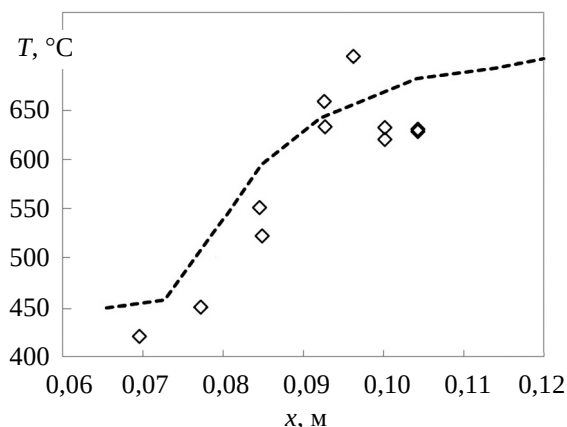
Р и с. 1. Экспериментальная установка KNS-Test (а) и поперечное сечение экспериментальной ТВС (б): 1 — положение газовых объемов; 2 — блокада 21%; 3 — обогреваемая секция твэлов с энерговыделением; 4 — пучок твэлов; 5 — дистанционирующая решетка; 6 — область без блокировки и энерговыделения; 7 — область с энерговыделением; 8 — область с блокировкой и энерговыделением

ставляла 4 м/с. В экспериментах измеряли температуру на поверхности твэлов при постоянной скорости теплоносителя на входе и постоянном заданном энерговыделении.

Экспериментальная сборка моделировалась шестигранной призмой высотой 0,34 м и размером «под ключ» 0,104 м. В поперечном сечении призма разбивалась на три части: заблокированная область с энерговыделением, свободная область с энерговыделением и без него (см. рис. 1, б). Блокировка моделировалась заданием большого местного гидравлического сопротивления. Для построения геометрии расчетной области и ее разбиения на элементы использовался пакет GMSH [9]. В итоге расчетная область была разбита на 3888 элементов.

На рис. 2 в качестве примера показано сравнение с экспериментальными данными расчетного распределения температуры теплоносителя в горизонтальном сечении сборки на удалении 70 мм от блокировки.

Среднее относительное отклонение расчетных результатов от экспериментальных составило 3%, среднеквадратичное — 13%, полная стандартная статистическая ошибка не превысила 17%. В целом получено удовлетворительное совпадение расчета с экспериментом. Среднее абсолютное отклонение температуры составляет около 11° (менее 3% максимального экспериментального подогрева).

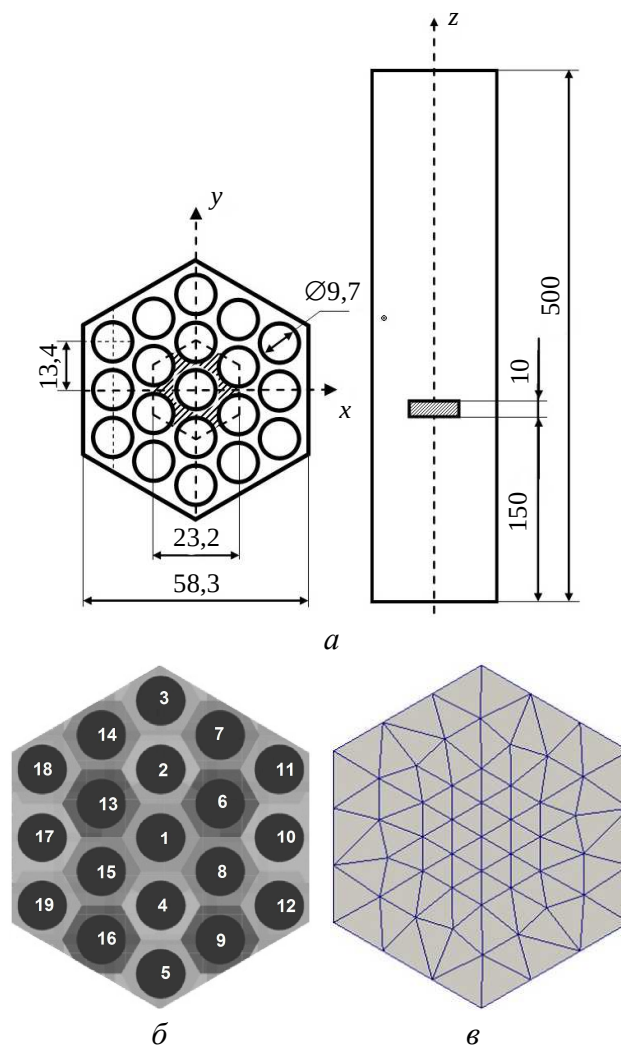


Р и с. 2. Температура теплоносителя в горизонтальном сечении сборки в сравнении с экспериментом

Модельная сборка реактора БРЕСТ. Тестирование разработанного кода APMod с использованием только экспериментальных данных затрудняется отсутствием в испытаниях и их описании многих необходимых условий и факторов, существенных для корректной проверки заложенных в код моделей протекающих процессов. В частности, в описании экспериментов нет данных о трехмерных полях температуры, давления и скорости в стационарных и нестационарных режимах течения теплоносителя в ТВС. Выходом из данной ситуации является проведение верификационных расчетов с использованием CFD-кода.

В настоящей работе выполнено такое сопоставление с верифицированным на течении тяжелого жидкометаллического теплоносителя DNS-кода с CONV-3D-кодом [5], относящимся к кодам нового поколения новой технологической платформы ядерной энергетики [10]. Преимущество такой верификации заключается в наличии полной информации о постановке расчетных задач, а также в возможности сопоставления усредненных скорости, давления и температуры теплоносителя во всех элементах расчетной области.

В качестве объекта моделирования был выбран фрагмент ТВС реакторной установки БРЕСТ-ОД-300, соответствующий центральной области активной зоны. При моделировании полной геометрии ТВС с помощью DNS-кода рассматривался фрагмент ТВС из 19 твэлов на участке высотой 0,5 м (рис. 3, а). Выбор этого фрагмента был обусловлен возможностью применения используемой в модуле APMod модели анизотропного пористого тела (не менее 19 твэ-



Р и с. 3. Геометрия рассматриваемой модельной сборки (а), вид и нумерация элементов усреднения, используемых при обработке результатов с помощью DNS-кода (б), APMod-разбиение поперечного сечения сборки (в)

лов) и характерными размерами описываемых теплогидравлических процессов. В качестве последних рассматривались процессы при обтекании локальной блокировки проходного сечения сборки. Течение теплоносителя в таких условиях носит трехмерный характер и поэтому может обоснованно использоваться для анализа используемых в модуле APMod моделей переноса.

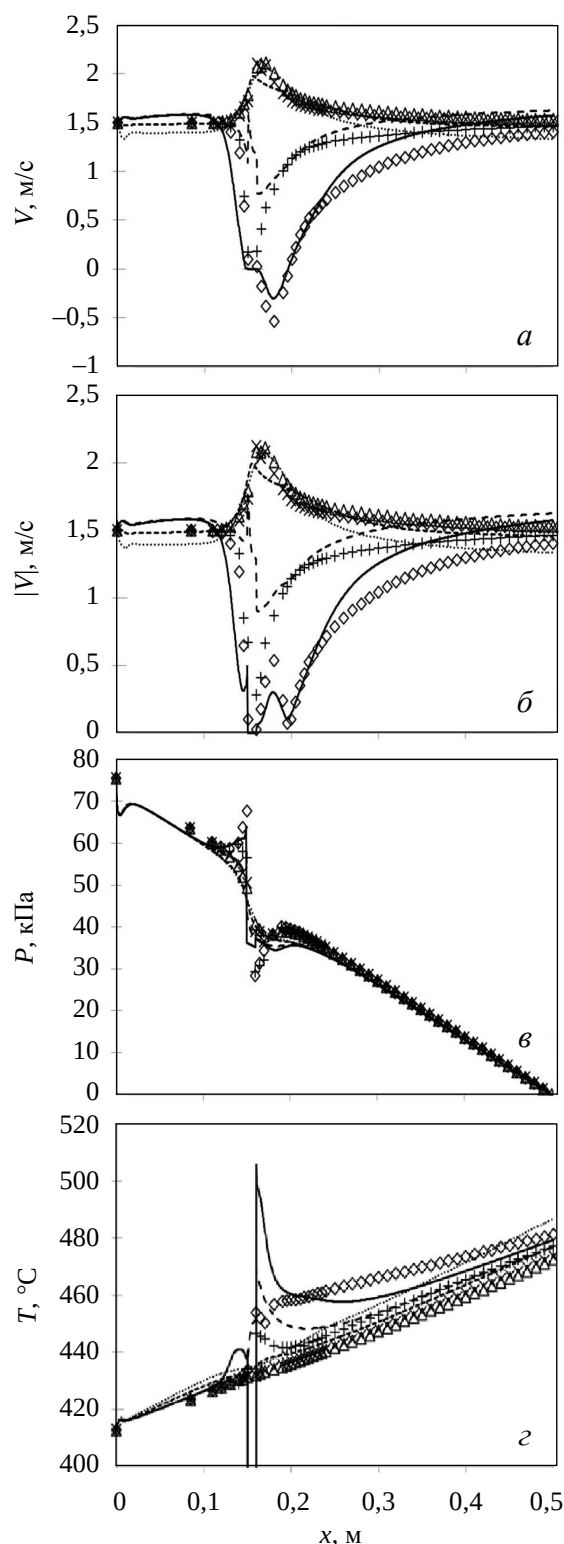
Моделировалось стационарное течение теплоносителя в сборке с постоянным по сечению и высоте энерговыделением при блокировке центральной части проходного сечения. Граничные и начальные условия выбирали с учетом режимов работы ТВС в активной зоне реактора БРЕСТ. В расчетах с помощью обоих кодов использовались температурные зависимости теплотехнических свойств свинца [6].

Рассчитанную по программе APMod продольную скорость свинцового теплоносителя, модуль полной скорости, давление и температуру свинца сравнивали с полученной по программе CONV-3D локальной скоростью, давлением и температурой в поперечном сечении сборки, усредненным по ячейкам усреднения программы APMod (рис. 3, б). Полученные таким образом средние значения сравнивали с полученными по APMod в соответствующих центрах стержней точках. Для граничных элементов часть выбранных таким образом элементов усреднения выходила за пределы рассматриваемой расчетной области. В таком случае усреднение выполнялось по их части, находящейся в пределах расчетной области.

Расчетная область для кода APMod соответствовала показанной на рис. 3, а модельной сборке. Она равномерно разбивалась по высоте на 50 элементов с шагом 0,01 м. Использованное разбиение в поперечном сечении показано на рис. 3, в. Всего расчетная область была разбита на 13 500 элементов.

Отклонение расчета модуля пористого тела от полученного с использованием DNS-кода качественно можно оценить по распределению по высоте сборки продольной скорости теплоносителя, ее модуля, перепада давления и температуры теплоносителя (рис. 4). Количественно погрешности расчета оценивали аналогично моделированию эксперимента. При этом в качестве экспериментальных рассматривались результаты DNS-расчета. При определении относительной погрешности в качестве масштаба, характерного для рассматриваемого процесса, выбирали для скорости скорость на входе в сборку, давления — давление на входе, температуры — максимальный подогрев в DNS-расчете. Получено удовлетворительное совпадение расчета с помощью кода APMod и расчета методом прямого численного моделирования с использованием кода CONV-3D (см. таблицу).

Максимальное отклонение верифицируемых параметров наблюдается в окрестности блокировки. Во многом это расхождение связано с различием используемых в расчете моделей сборки. В приближении пористого тела вся сборка, включая блокировку, рассматривается как сплошная среда с постоянной пористостью, блокировка моделировалась посредством увеличенного гидравлического сопротивления.



Р и с. 4. Расчетная по программе APMod продольная скорость (а), модуль скорости (б), полный перепад давления (в), температура теплоносителя (г) по высоте сборки для точек, соответствующих центру твэла № 1 ($\diamond$), 2 (+), 3 ($\triangle$), 7 ($\times$) на рис. 3, б, в сравнении с результатами DNS с CONV-3D-кодом (—, — —, · · ·, — · —)

В DNS-расчетах рассматривалась геометрия сборки с непроницаемой блокировкой из металлического листа. В совокупности это приводило

**Отклонение верифицируемых параметров
от результатов DNS-расчета**

Параметр	Отклонение, %		Среднеквадратичное отклонение
	максимальное среднее в поперечном сечении	среднее по объему	
Продольная скорость	16	2	11
Модуль скорости	23	2	10
Перепад давления	6	2	3
Температура	22	4	8

к некоторому уменьшению скорости потока теплоносителя в районе блокировки, а также снижению его температуры непосредственно за блокировкой по сравнению с результатом DNS-расчета.

Заключение. Расчетные исследования теплогидравлических процессов в ТВС с локальной блокировкой проходного сечения для реакторов с жидкометаллическим теплоносителем показали возможность использования предложенной модели анизотропного пористого тела и программы на ее основе для описания трехмерных процессов переноса в активной зоне и теплообменных устройствах ЯЭУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Девкин А.С., Мелихов О.И., Москалев А.М. и др. Зарубежные теплогидравлические коды улучшенной оценки. Опыт разработки, создание и применение. М., ОЦРК при Минатоме РФ, 2000. 176 с.

2. Корсун А.С., Круглов В.Б., Меринов И.Г. и др. Теплоперенос при обтекании структур типа пучков стержней в приближении модели пористого тела. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-реакторные константы, 2014, № 2, с. 87—94.
3. De Lemos M. Turbulence in Porous Media: Modeling and Applications. 2nd Ed. Nederland: Elsevier Ltd., 2012. 408 p.
4. Власов М.Н., Корсун А.С., Маслов Ю.А. и др. Определение параметров интегральной модели турбулентности применительно к расчету обтекания стержневых сборок в приближении пористого тела. — Теплофизика и аэромеханика, 2016, т. 23, № 2(98), с. 209—218.
5. Чуданов В.В., Аксенова А.Е., Макаревич А.А. и др. Применение CFD-кода CONV-3D в реакторных приложениях. — Атомная энергия, 2016, т. 121, вып. 3, с. 140—143.
6. Кириллов П.Л., Бобков В.П., Жуков А.В., Юрьев Ю.С. Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике. Т. 1. Теплогидравлические процессы в ЯЭУ. Под ред. П.Л. Кириллова. М.: ИздАТ, 2010. 771 с.
7. Automated Solution of Differential Equations by the Finite Element Method. Lect. Not. in Comp. Sci. and Engng. Eds. A. Logg, K.-A. Mardal, G. Wells. Germany: Springer, 2012. 671 p.
8. Hubler F., Pepler W. Summary and Implications of Out-of-Pile Investigations of Local Cooling Disturbances in LMFBR Subassembly Geometry under Single-Phase and Boiling Conditions. KfK Rep. 3927. Germany, Karlsruhe, May 1985. 184 p.
9. Geuzaine C., Remacle J.-F. Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. — Intern. J. Num. Meth. in Engng, 2009, № 79(11), p. 1309—1331.
10. Большов Л.А., Мосунова Н.А., Стрижов В.Ф., Шмидт О.В. Расчетные коды нового поколения для новой технологической платформы ядерной энергетики. — Атомная энергия, 2016, т. 120, № 6, с. 303—312.

Поступила в Редакцию 26.10.17

УДК 621.039.531

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ОКСИДА ИТТРИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ГЕЛИЕВОЙ ПОРИСТОСТИ В ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННОЙ ОКСИДАМИ СТАЛИ

*Николаева И.Д., Стальцов М.С., Чернов И.И., Калинин Б.А., Богачев И.А., Гусева Л.Ю.,
Дрожжина М.В., Беляев А.А., Тищенко А.Г. (НИЯУ МИФИ, г. Москва),
Коршунов С.Н. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)*

Для быстрых реакторов нового поколения с повышенным выгоранием топлива и, возможно, термоядерных реакторов перспективна мало-распухающая хромистая сталь, недостаточную жаропрочность которой планируют увеличить посредством дисперсного упрочнения нано-

размерными оксидами, в том числе оксидом иттрия. Такая сталь изготавливается методами порошковой металлургии, одним из которых является электроимпульсное спекание. Однако в условиях облучения до большой повреждающей дозы, соответствующей глубокому выгоранию