

34. **Takeda H., Koga T., Kanno J.** Study on similarity rule for natural convection water test of LMFBR. — In: IWGFR/88, 1993, p. 58—66.
35. **Ушаков П.А., Сорокин А.П.** Проблемы моделирования на воде аварийного отвода остаточного тепловыделения естественной конвекцией в камерах быстрых реакторов: Препринт ФЭИ-2585, 1997.
36. **Ushakov P.A., Sorokin A.P.** Modeling problems of emergency natural convection heat removal in the upper plenum of LMR using water. — In: Proc. of 9th Intern. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-9). USA, October 3—8, 1999.
37. **Ушаков П.А., Сорокин А.П.** Роль гидравлических сопротивлений при моделировании на воде естественной конвекции в баках быстрых реакторов. — Теплоэнергетика, 2000, № 5, с. 9—14.
38. **Опанасенко А.Н.** Теплогидравлика в верхней области бака быстрого реактора в различных режимах работы: Препринт ФЭИ-2623, 1997.
39. **Опанасенко А.Н., Сорокин А.П., Труфанов А.А. и др.** Экспериментальные исследования полей температуры и скорости на интегральной водяной модели быстрого реактора в различных режимах работы. — Атомная энергия, 2017, т. 123, вып. 1, с. 21—27.
40. **Shulz H.** Experience with thermal fatigue in LWR piping caused by mixing and stratification. — In: Specialists Meeting Proc. Paris, 1998, p. 13—18.
41. **Боришанский В.М., Готовский М.А., Фирсова Э.В.** Теплоотдача к жидким металлам в продольно омываемых пучках стержней. — Атомная энергия, 1969, т. 27, вып. 6, с. 549—551. // **Borishanskii V.M., Gotovskii M.A., Firsova E.V.** Heat Transfer to Liquid Metals in Longitudinally Wetted Bundles of Rods. — Soviet Atomic Energy, 1969, v. 27, p. 1347—1350.
42. **Shah M.** A survey of experimental heat transfers data for nuclear pool boiling of liquid metals and new correlations. — Intern. J. Heat Fluid Flow, 1992, v. 13, № 4, p. 370—379.
43. **Корхов О.А., Богословская Г.П., Сорокин А.П.** О сопоставлении данных по кипению жидких металлов: Препринт ФЭИ-2649, 1997.
44. **Кириллов П.Л.** Банк данных по теплообмену в жидких металлах: Препринт ФЭИ-3276, 2017.
45. **Сорокин А.П., Иванов Е.Ф., Мальков В.Л. и др.** Экспериментальные исследования теплообмена и устойчивости кипения жидкометаллического теплоносителя в контуре естественной циркуляции: Препринт ФЭИ-2631, 1997.

Поступила в Редакцию 25.05.19

УДК 621.039.586

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЙ В ПУЧКАХ ТВЭЛОВ С ПОМОЩЬЮ КОДА CONV-3D

Чуданов В.В., Аксенова А.Е., Первичко В.А. (ИБРАЭ РАН, г. Москва)

e-mail: chud@ibrae.ac.ru

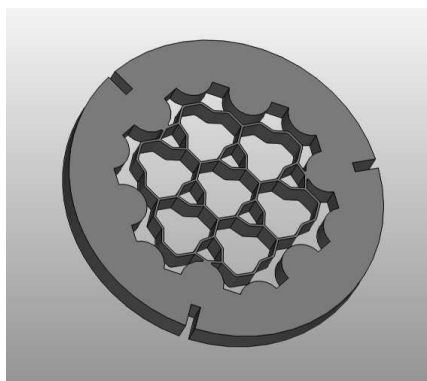
Для обоснования теплогидравлических характеристик ядерных энергетических установок и анализа их изменения в переходных процессах и аварийных ситуациях используются как системные, так и универсальные термогидродинамические CFD-коды [1]. При этом на основе экспериментальных исследований пополняется база данных, назначением которой является обеспечение конструкторов и разработчиков расчетных кодов экспериментальными данными о распределении наиболее важных гидродинамических характеристик при течении теплоносителя в ТВС. Полученные данные позволят указать направления оптимизации параметров ТВС и ТВЭлов реакторных установок промышленно-энергетического комплекса и дополнить матрицу верификации разрабатываемых CFD-кодов.

Для пополнения верификационной базы данных разрабатываемых CFD-кодов были использованы эксперименты по исследованию па-

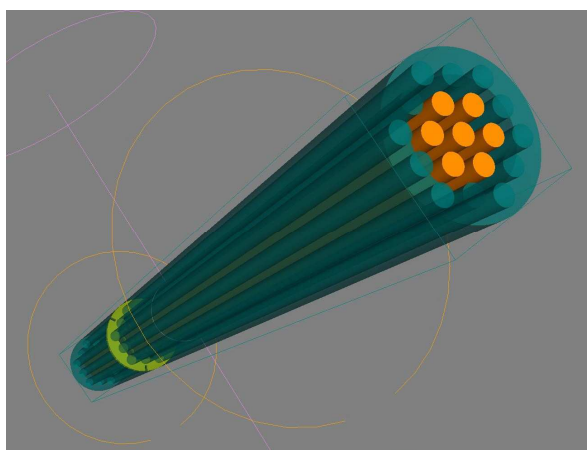
раметров течения теплоносителя в пучках ТВЭлов, проводимые в Новосибирском филиале ИБРАЭ РАН [2].

В настоящей статье приведены результаты верификационных расчетов, выполненных по программе «Прецизионный масштабируемый вихреразрешающий CFD-модуль на базе DNS-приближения, ориентированный на петафлопсные (10^{15}) вычислительные ЭВМ. Версия 3.0» (сокращенно код CONV-3D) [3].

Постановка задачи. Для расчетов были взяты обечайка и дистанционирующая решетка в формате STEP и конвертированы в формат STL, после чего добавлены семь ТВЭлов и построена расчетная сетка с помощью специально разработанного для кода CONV-3D модуля расчетных областей и сеток GeometryEditor [4] (рис. 1, 2). Длина ТВЭлов 400 мм. Основные результаты были получены для диаметра ТВЭла 9 и 10 мм и расстояния между ТВЭлами s/d по отношению к диаметру 1,4. Расчеты проводили



Р и с. 1. Экспериментальная геометрия дистанционирующей решетки в формате STEP

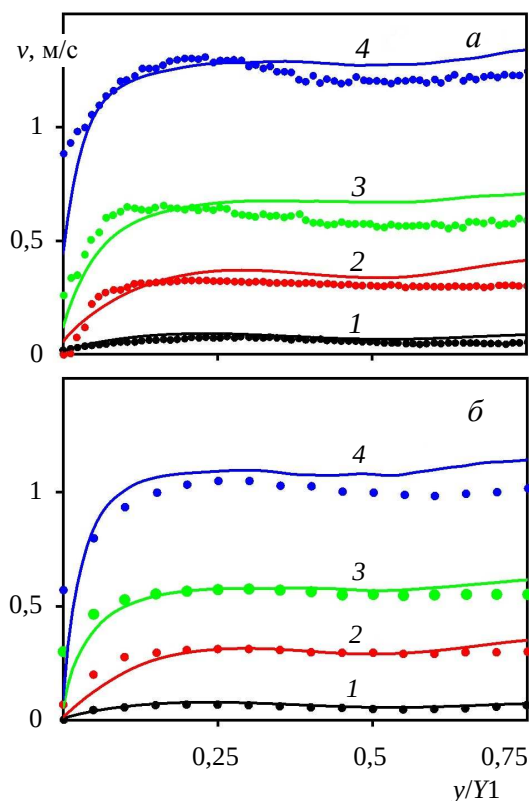


Р и с. 2. Расчетная геометрия в формате STL

на последовательности сгущающихся сеток $105 \times 105 \times 961$, $121 \times 121 \times 961$, $161 \times 161 \times 1281$, $193 \times 193 \times 1441$ в ламинарном, переходном и турбулентном режиме при числе Рейнольдса $Re \leq 10^4$. Была показана сходимость на последовательности сеток.

Соответствующие начальные и граничные условия задавали с помощью специально разработанного для кода CONV-3D модуля создания вычислительного сценария EditInp [5]. В качестве модельной жидкости в экспериментах применяли дистиллированную воду и ферри-ферроцианидный электрохимический раствор на основе дистиллированной воды, физические свойства которых при комнатной температуре совпадают. Расчеты проводили с использованием конвективного оператора, обеспечивающего энергетическую нейтральность (схемная вязкость пренебрежимо мала).

Расчет скорости теплоносителя при разном диаметре твэла и числе Рейнольдса 500, 2500, 5000 и 10 000. На рис. 3 показана расчетная скорость от нормированной координаты на



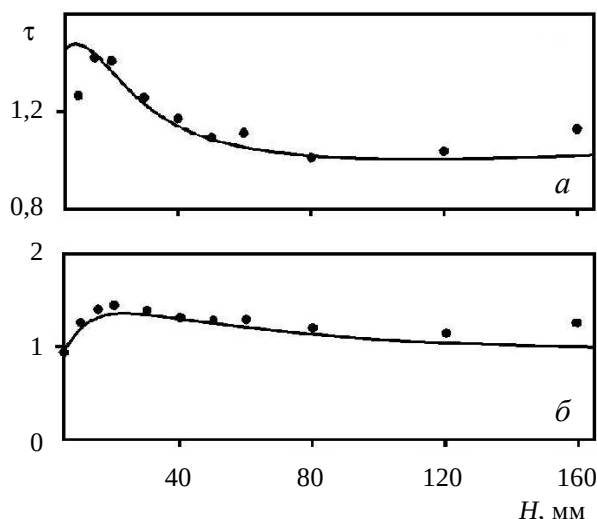
Р и с. 3. Расчетная (—) и экспериментальная скорость теплоносителя (○) для диаметра твэла 9 (а), 10 мм (б) при числе Рейнольдса 500 (1), 2500 (2), 5000 (3), 10 000 (4)

удалении 200 мм от дистанционирующей решетки в сравнении с измеренной [2]. Видно хорошее совпадение численного расчета и эксперимента: относительное отклонение в поточечной норме C для диаметра твэла 9 мм составляет $\sim 10\%$, диаметра 10 мм — $\sim 5\%$.

Расчет трения при числе Рейнольдса 500, 2500, 5000 и 10 000. На рис. 4 показано трение вдоль продольной координаты на удалении от дистанционирующей решетки 5—160 мм в сравнении с измеренным [2]. Видно удовлетворительное совпадение численного расчета и эксперимента: относительное отклонение в поточечной норме C не превышает 15%.

В таблице приведены оценки коэффициента гидравлического сопротивления и трения для разных чисел Рейнольдса, а также градиенты давления при соответствующих безразмерных значениях ячейки сетки вблизи стенки Y^+ .

В таблице показано хорошее совпадение расчетного коэффициента трения и коэффициента гидравлического сопротивления с формулой [6] для оценки коэффициента гидравлического сопротивления



Р и с. 4. Расчетное (—) и экспериментальное трение (●) вдоль горизонтальной координаты для числа Рейнольдса 2500 и $s/d = 1,2$ (а), 5000 и $s/d = 1,4$ (б)

Расчетный коэффициент гидравлического сопротивления ξ и трения τ для диаметра твэла 9 мм, гидравлического диаметра 0,0093 и $s/d = 1,4$ при разном числе Рейнольдса

Re	W, м/с	grad P	Y^+	ξ [6]	τ [6]	Погрешность τ , %
500	0,054	0,027	2,4	0,16	0,07	—
2500	0,269	0,17	4,5	0,043	0,388	5
5000	0,539	0,528	7	0,033	1,198	5
10 000	1,070	1,454	9	0,023	3,299	7

$$\xi = \text{grad } PD_h / 0,5\rho w^2,$$

где P — давление; D_h — гидравлический диаметр; ρ — плотность; w — скорость, и коэффициент трения $\tau = \xi \rho w^2 / 8$. Относительное отклонение коэффициента трения не превышает 7%.

Заключение. Таким образом, CFD-код CONV-3D может быть использован для расчета

тепло- и гидродинамических параметров течения (локальное трение, коэффициент гидравлического сопротивления) в пучках твэлов в ламинарном, переходном и турбулентном режиме.

Сравнение показало, что при разных числах Рейнольдса и отношении s/d относительное отклонение скорости теплоносителя, рассчитанное с помощью кода CONV-3D, от экспериментального в поточечной норме не превысило 10%, коэффициента трения — 15%.

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. Будников А.В., Шмелев Е.И., Куликов Д.А. и др. Измерения гидродинамических и вибрационных характеристик для валидации численных расчетов возбуждения конструкций потоком жидкости. — Приборы и методы измерений, 2019, т. 10, № 3, с. 223—232.
3. 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. // Chudanov V.V., Akseanova A.E., Makarevich A.A. et al. Use of the CFD-code CONV-3D in Reactor Applications. — Atomic Energy, 2017, v. 121, № 3, p. 179—184.
4. Аксенова А.Е., Первичко В.А., Чуданов В.В. и др. Геометрический редактор Geometry_Editor для вычислительного модуля CONV-3D: Препринт ИБРАЭ № ИБРАЭ—2015-03, 2015. 40 с.
5. Аксенова А.Е., Коротов А.А., Первичко В.А., Чуданов В.В. Редактор сценария EditInp вычислительного модуля CONV-3D: Препринт ИБРАЭ № ИБРАЭ—2018-11, 2018. 54 с.
5. Кириллов П.Л. Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике. Т. 3. Теплогидравлические процессы при переходных и нестандартных режимах. Тяжелые аварии. Защитная оболочка. Коды, их возможности, неопределенности. М.: ИздАт, 2014. 688 с.

Поступила в Редакцию 26.11.19

УДК 621.039.31

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРЯМОУГОЛЬНОГО КАСКАДА ЦЕНТРИФУГ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ

Азизов Т.Э., Смирнов А.Ю., Сулаберидзе Г.А. (НИЯУ МИФИ, г. Москва)

e-mail: t.e.azizov@gmail.com

В практике получения стабильных изотопов методом газовой центрифуги часто используют каскады с одинаковым по ступеням потоком питания, или прямоугольные каскады [1, 2]. Такие каскады относительно просто реализуемы,

что делает удобным их использование, в частности, при разделении нескольких изотопных смесей в одном каскаде [2, 3]. Одним из примеров является обогащение применяемого в гелиево-кадмиевых лазерах ^{116}Cd до концентрации не