

## РАСЧЕТ CFD-МЕТОДОМ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРЯМОУГОЛЬНОГО КАНАЛА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ПЕРЕГОРОДКАМИ

**А.А. Казанцев\*, А.С. Кондратьев\*\*, Ю.Д. Левченко\*\***

*\*ЭНИМЦ «Моделирующие системы», г. Обнинск*

*\*\*ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт, г. Обнинск*



В теплофизике реакторов актуальной является задача совместного использования «кодов лучшей оценки» (TRAC, RELAP5) и кодов вычислительной гидродинамики (CFD-кодов). В работе в качестве CFD-кода использовался пакет программ OpenFOAM [1]. Для группы «кодов лучшей оценки», основного современного расчетного инструмента, необходимо задавать коэффициенты гидравлического сопротивления, получаемые экспериментально. Современные CFD-коды способны получать эти коэффициенты сами в результате «численных экспериментов». Данное свойство очень важно для контуров реакторов, в которых на длине в несколько десятков гидравлических диаметров расположены местные гидравлические сопротивления, нелинейно влияющие друг на друга. Это приводит к значительной погрешности проектных расчетов перепада давления по первому контуру.

Для проверки применимости CFD-метода выполнено сравнение с опытными данными. Вариантные расчеты выполнялись для прямоугольного канала с перегородками с переменным шагом – от минимального до интервала превышающего длину гидродинамической стабилизации. Результаты расчетов с приемлемой для практики точностью совпали с экспериментом.

**Ключевые слова:** вычислительная гидродинамика, OpenFOAM – пакет с открытым исходным кодом,  $k$ - $\varepsilon$ -модель турбулентности, верификация, типовые ошибки.

**Key words:** CFD- (Computational Fluid Dynamic), OpenFOAM (Open source file operation and manipulation),  $k$ - $\varepsilon$ -turbulence model, verification, typical mistakes.

В энергетической программе России предусматривается создание новых типов реакторов с водо-водяными и жидкометаллическими теплоносителями. Задача получения гидравлического сопротивления при проектировании первых контуров реакторов с заданной точностью является актуальной. Однако многолетняя практика проектирования показала, что принципиально невозможно получить с требуемой точностью сопротивление первого контура при использовании ручных

инженерных методов расчета или при использовании «кодов лучшей оценки», основанных на представлении сопротивления контура в виде суммы последовательных сопротивлений, получаемых из справочников по гидравлическим сопротивлениям. Все новые проекты имели погрешности более сотни процентов независимо от предыдущего опыта проектантов. Причина заключается в том, что хотя каждое отдельное сопротивление рассчитывается с точностью менее 10%, взаимное влияние группы рядом расположенных сопротивлений контура можно учесть либо экспериментально на гидромодели всего контура, что слишком дорого, либо методами вычислительной гидродинамики. Поэтому во всех новых проектах в мире [2] поставлена научная проблема перехода к кодам вычислительной гидродинамики (CFD-кодам) при сохранении использования «кодов лучшей оценки» (TRAC, TRACE, RELAP5, KOPCAP) для обоснования безопасности ЯЭУ.

Целью работы являлось проведение верификации расчетного CFD-аппарата с помощью экспериментальных данных. В справочных рекомендациях накоплен большой объем исследований, но невозможно получить и представить информацию о взаимном влиянии местных гидравлических сопротивлений из-за большого разнообразия практически возможных случаев. В настоящее время имеется надежда, что CFD-подход позволит выполнить поставленную задачу. Этот подход гибок и позволяет выполнять моделирование на воздухе, воде и жидких металлах при использовании моделей турбулентности.

В работе исследовалась возможность учитывать взаимное влияние сопротивлений путем применения *CFD-пакета программ OpenFOAM* [1]. Для гладкого прямоугольного канала проведено сравнение расчетного и опытного профилей скорости в турбулентном потоке воздуха [3]. Вариантные расчеты выполнялись для прямоугольного канала с расположенными по длине поперечными перегородками. Для двух вариантов геометрии из трех перегородок в канале расчеты гидравлических потерь давления были проведены во всем диапазоне расстояний между перегородками – от минимального до интервала, превышающего длину гидродинамической стабилизации потока жидкости. Результаты расчетов и опытов совпали с приемлемой для практики точностью.

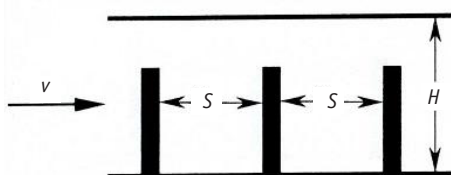
Выполнялись расчеты серии задач для гладкого канала прямоугольного сечения 42×80 мм с двумя наборами поперечных перегородок. Интервалы расположения между тремя последовательно расположенными перегородками менялись от минимального (1 мм) до превышающего длину стабилизации. При максимальных расстояниях между перегородками получены расчетные результаты, которые совпали с опытными данными по сопротивлениям суммы трех одиночных сопротивлений с точностью до экспериментальных погрешностей.

На рисунке 1 показана схема двух вариантов расположения перегородок S3 и LS3 в прямолинейном гидравлически гладком канале прямоугольного сечения 42×80 мм. Размеры сечения перегородок, представленные на рисунке, равнялись 6×26,7 мм. Длина перегородки равнялась  $80^{-0,2}$  мм.

На рисунке 2 представлены расчетные сетки геометрии каналов для двух серий экспериментов. Варианты S3 и LS3 являются системами плохобтекаемых тел. Каждая из перегородок является местным гидравлическим сопротивлением. Гидравлические потери давления на длине всего участка канала зависят от шага расположения перегородок, т.е. от степени взаимного влияния перегородок. На рисунке 1 в табличной форме представлены опытные данные [3] для коэффициентов сопротивления каждого из вариантов.

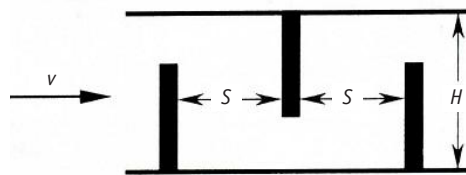
На рисунке 3 приведено сравнение расчетов с экспериментом при изменении коэффициентов гидравлического сопротивления участков канала с тремя высту-

Вариант S3



$S, \text{ мм}$	$\zeta_{1,2}$	$S, \text{ мм}$	$\zeta_{1,2}$
0	12,17	104	23,17
4	9,98	144	29,63
11	9,24	194	37,64
14	9,10	244	42,55
24	9,6	289	43,47
34	10,59	334	43,53
51	14,74	404	43,85
74	18,73	474	43,81

Вариант LS3



$S, \text{ мм}$	$\zeta_{1,2}$	$S, \text{ мм}$	$\zeta_{1,2}$
6	128,84	144	50,37
12	92,81	184	46,86
19	90,66	234	44,08
32	82,41	244	42,63
44	78,19	329	41,98
54	74,77	394	42,50
69	71,67	474	42,52
94	61,66	—	—

Рис. 1. Схемы двух вариантов геометрии канала прямоугольного сечения при двух вариантах расположения перегородок S3 и LS3, опыты [3]. Таблично приведены линейные размеры шагов и значения коэффициентов гидравлического сопротивления

пами по схемам расположения S3 и LS3. Расчеты перепадов давления на длине участков канала с выступами были проведены для  $Re=40000$ . Численные значения опытных и расчетных результатов при дискретных величинах шагов между выступами « $s$ » даны выше.

Отметим, что при организации течения жидкости по лабиринту (вариант LS3) результаты расчетов отличались от опытных не более чем на 12%. Для варианта S3 расчет описывает немонотонное экспериментальное изменение зависимости  $\zeta = f(s)$ , наблюдающееся при малых значениях шага между перегородками.

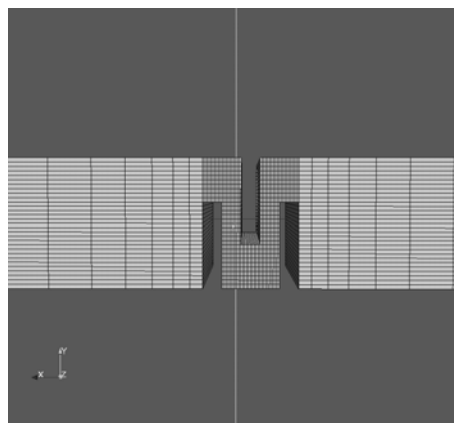
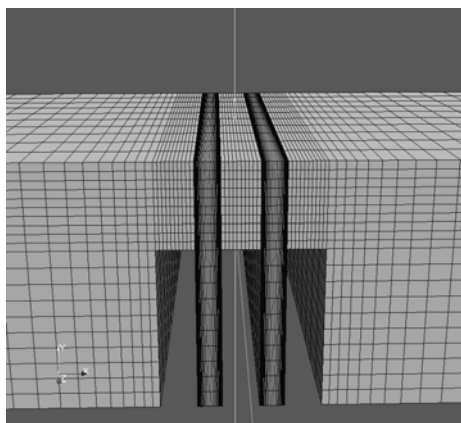


Рис. 2. Расчетные сетки двух вариантов геометрии S3 и LS3 расположения перегородок, использованные для расчетов гидравлического сопротивления в прямоугольном канале

С помощью перегородок в канале прямоугольного сечения также формировалась геометрия проточной части с принципиально трехмерным течением жидкости (рис. 4). Выступы устанавливались последовательно у нижней, боковой и верхней поверхностей. Каждым выступом перекрывалось одинаковое проходное сечение канала. Совпадение результатов расчетов и опытов авторы настоящей работы считали удовлетворительным.

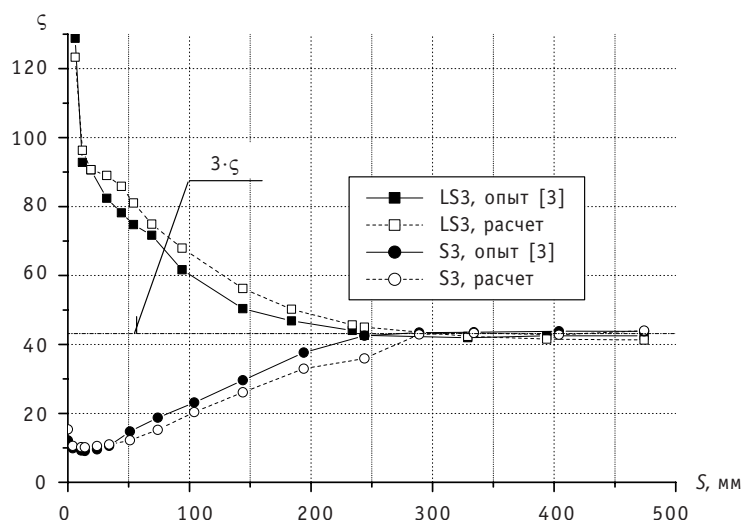


Рис. 3. Изменения коэффициентов местного гидравлического сопротивления для двух вариантов каналов S3 и LS3 с различным шагом расположения перегородок в прямоугольном канале.  $Re=40\,000$

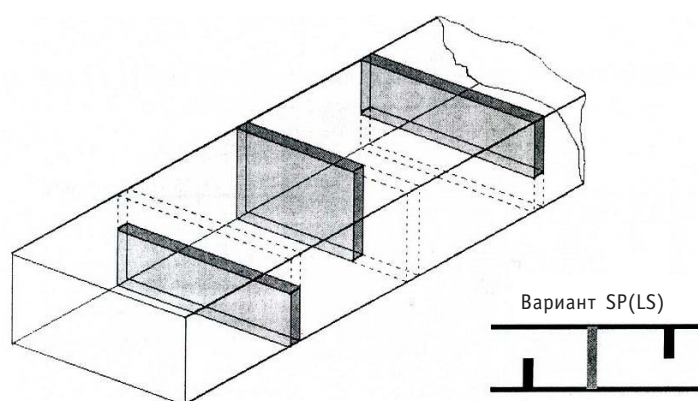


Рис. 4. Схема расположения прямоугольных перегородок в экспериментальном канале по схеме SP(LS) для расчетов по OpenFOAM

При выполнении работы возникал вопрос: какова работоспособность кода при отсутствии заранее полученных опытных данных, т.е. проверка достижения расчетных результатов «вслепую». Идеальный код должен не только воспроизводить результаты известных экспериментальных задач, но и получать новые результаты в известных рамках допустимого для него круга задач.

Для исключения «влияния пользователя» и обеспечения достоверности результатов необходимо исключить известные типовые вычислительные ошибки. Существует пять «типовых ошибок» при использовании кодов. Невозможно получить удовлетворительные результаты кода, если допущены следующие серьезные ошибки.

1. *Выбраны слишком большие размеры ячеек или шагов по времени. В результатах расчетов не устраняется влияние разбиения сетки.*

Методика оценки погрешности заключалась в сравнении решений при размельчении сетки. Повышение точности достигалось за счет введения неравномерной сетки. Измельчение сетки производилось там, где имелись значительные градиенты скорости. Ограничением является кубический рост времени счета в зависимости от числа узлов сетки, поскольку основную часть времени забирает метод Га-

усса, имеющий кубическую зависимость времени счета от числа расчетных узлов. При этом измельчение размера ячеек приводит к падению шага по времени, определяемому критерием устойчивости Куранта.

2. *Выбор критериев сходимости для нелинейного итерационного решения для системы уравнений без достаточного обоснования. Критерии сходимости являются слишком грубыми.*

Условие обеспечивалось выбором различных критериев сходимости и анализом чувствительности их влияния на решение. Задавались разное число итераций и величина критериев достижения точности (невязки) для разных переменных.

3. *Программные ошибки в машинном коде.*

Для получения достоверных результатов сначала решался ряд тестовых задач на выбранном *решателе*, чтобы убедиться в его работоспособности и понять, что он может считать. Лучший выход – тестирование на решениях аналитических задач, на которых можно проверить влияние неравномерности сетки. Перед серийными расчетами авторы провели решение системы дифференциальных уравнений на тестовой задаче, для которой известен аналитический ответ. Особое внимание уделялось проверке отсутствия ложных источников массы и импульса.

4. *Ошибки в задании исходных данных для моделирования эксперимента.*

Идеальных экспериментальных данных никогда не бывает – данные часто противоречивы, берутся по экспертным оценкам или для разных режимов, а приписываются одному режиму. Для рассматриваемой в статье геометрии канала экспериментальная погрешность в шаге размещения перегородок составляла  $\pm 0,5$  мм. Роль этой погрешности возрастала при  $s \rightarrow 1$  мм, т.е. на участках с наибольшими абсолютными значениями градиентов кривых  $\zeta = f(s)$ . Из анализа экспериментальных кривых изменения коэффициента гидравлического сопротивления участка проточной части канала от шага « $s$ » было установлено, что при  $s \rightarrow 1$  мм погрешность экспериментальных результатов возрастала на 8% для варианта геометрии LS3 по сравнению с оцененной экспериментальной погрешностью в 5%. Этот факт учитывался при сравнении расчетных и опытных результатов.

Для кодов, моделирующих турбулентность, сложным является задание входных данных для массивов переменных, описывающих параметры модели турбулентности. Для кинетической энергии турбулентности  $k$  и скорости ее диссипации  $\varepsilon$  для входного сечения величина находились по формулам

$$k = \frac{3}{2} \cdot U^2 \left( \frac{\sqrt{\xi}}{\sqrt{8}} \right)^2, \quad \varepsilon = \frac{(0,09)^{0,75} \cdot (k)^{1,5}}{0,4 \cdot \left( \frac{h}{2} \right)}.$$

Здесь используются коэффициент сопротивления  $\chi$ , средняя скорость на входе  $U$ , ширина канала по меньшему размеру  $h$ , постоянная Кармана 0,4 и константа  $k$ - $\varepsilon$ -модели турбулентности  $C_\mu = 0.09$ .

Выполнялось несколько вариантных расчетов при увеличении и уменьшении этих параметров, чтобы убедиться в слабой зависимости получаемых результатов от задания входных условий в модели турбулентности.

5. *Ошибки в понимании результатов расчета, выдаваемых кодом.*

Можно решить только те задачи, для которых есть возможность задать правильные граничные условия, условия однозначности граничных и начальных условий, геометрических линейных размеров и т.п. Использовался метод фиктивного расширения области для обеспечения длины стабилизации. На участке канала после трех местных сопротивлений (перегородок) моделировалась фиктивная труба с длиной, равной участку гидродинамической стабилизации (этого участка не было

в эксперименте). На выходе трубы задавались нулевые производные по длине от основных переменных и атмосферное давление. Без этого фиктивного участка (в эксперименте он равен 0,30 м, а в расчетной схеме принят 1,85 м) результаты расчетов были весьма странными вследствие «защемления» решения граничными условиями задачи.

Для каждой из задач проверялись все изложенные выше пункты, поэтому общее время решения задачи (в режиме круглосуточных расчетов) составило несколько месяцев.

Серия рассматриваемых задач считалась на PC с материнской платой P5KC, двухъядерным процессором Core 2 Duo Pentium E8650 с частотой 3ГГц, с 4 Гб памяти DDR3. Использовалось лицензионно чистое рабочее место и программное обеспечение с открытым исходным кодом – Операционная система Linux Debian 4.0 с ядром 2.6.22-3-AMD64, CFD-пакет программ OpenFoam-1.6 [1]. Для создания сетки использовался пакет SALOME-4.1.4 [4].

Характерное время решения двумерной задачи – 15 ч (на 1 с реального времени методом установления). Время решения 3D-задачи – 1 неделя (на сетке, на которой практически перестало изменяться решение). Для последней задачи было выполнено пять последовательных измельчений шагов 3D-сетки по поперечным к потоку направлениям для обеспечения достижения условий неизменности результатов по перепаду давления.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

- Для варианта S3 путем расчета успешно описано немонотонное изменение зависимости при малых значениях шага между перегородками. На расстояниях между перегородками, превышающих длину их взаимного влияния, опытное значение  $\zeta$ , равное утроенному сопротивлению одиночной перегородки, отличалось от расчетного не более чем 5%.

- При организации течения жидкости по лабиринтному варианту LS3 результаты расчетов отличались от опытных не более 12%.

- Расчет CFD-пакетом программ OpenFOAM позволил правильно описать сложное трехмерное турбулентное течение жидкости и получить гидравлические потери при взаимном влиянии местных гидравлических сопротивлений.

## **Литература**

1. Open FOAM The Open Source CFD-Toolbox (User Guide) Version 1.6, 24<sup>th</sup> July 2009 (<http://www.opencfd.co.uk/>)
2. Guelfi A., Boucker M., Herard J.-M., Peturaud P. A new multi-scale platform for advanced nuclear thermal hydraulic. Status and prospects of Neptune project/The 11 International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulic (NURETH-11) 2005.
3. Ефанов А.Д., Левченко Ю.Д., Федотовский В.С., Шукин Н.М. Гидравлические потери в контуре с взаимным влиянием местных сопротивлений//Теплоэнергетика. – 1997. – Т. 3. – С. 8-13.
4. <http://www.salome-platform.org> – SALOME: The Open Source Integration Platform for Numerical Simulation

Поступила в редакцию 24.12.2009



**УДК 621.039.51**

*Calculations of 3D-Flow by CFD-Code OpenFOAM\A.A. Kazantsev, V.R. Anisanyan; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 10 pages, 6 illustrations. – References, 21 titles.*

Calculations 3D modelling with use of methods of computation fluid dynamic are presented for flow in cylinder with closed top. With use of two popular models of turbulence the testing of code OpenFOAM is carried out on the basis of comparison with experimental data.

**УДК 621.039.53**

*Calculation by CFD-Method the Hydraulic Resistance for Rectangular Channel at Different Gap between Obstacles\A.A. Kazantsev, A.S. Kondratiev, Yu.D. Levchenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 6 pages, 4 illustrations. – References, 4 titles.*

The problem of parallel operation the best estimation codes (TRAC, RELAP5) and codes of computational fluid dynamics (CFD codes) is actual in field of thermal physics of reactors. In the present paper there was used the software package OpenFOAM [1] as CFD code. For group of the “best estimation codes” as the basic calculation method at present, it is necessary to set the factors of hydraulic resistance obtained from experiment. Modern CFD codes are able to receive these factors of hydraulic resistance as result of “numerical experiments”. The given property is very important for reactor circuits in which on length of some tens hydraulic diameters local hydraulic resistance are located, with nonlinear interaction on each other. It results in a significant error of design calculations of pressure difference on the primary circuit.

The comparison between the experimental data and results of 3D calculations was performed in order to check the applicability of CFD method. Serial calculations were carried out for the rectangular channel for variants with different gaps between obstacles from minimal up to an interval exceeding length of hydrodynamic stabilization. Results of calculations are slightly differs from experimental data with acceptable accuracy for practice.

**УДК 621.039.534:536.24**

*Experimental Research of Heat Removing during Steam Condensation at Vertical Multi-Row Slightly Inclined In-line Tube Bank\G.I. Tarasov, A.N. Sinicin, V.A. Babin, M.A. Bolshukhin, S.G. Antipin, A.V. Belin, A.G. Vasyatkin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 10 pages, 3 illustrations. – References, 5 titles.*

Here are presented results of experimental research and generalization of the experimental data on heat transfer rate under complete condensation of the descending flow of the prime water steam on the outer surface of vertical multi-row slightly inclined in-line tube bank under pressure of the condensing steam equal to 0,2-2,0 MPa.

**УДК 621.039.534:536.24**

*Experimental Research of Heat Removing during Steam Condensation at Vertical Multi-Row Slightly Inclined In-line Tube Bank\G.I. Tarasov, A.N. Sinicin, V.A. Babin, M.A. Bolshukhin, S.G. Antipin, A.V. Belin, A.G. Vasyatkin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 3 illustrations. – References, 2 titles.*

Here are presented results of experimental research steam condensation conditions from steam-gas mix on the outer surface of vertical multi-row slightly inclined in-line tube bank in the absence and in the presence of relief non-condensable gas from tube space.

**УДК 621.039.534**

*An Experimental Research of Properties of the Boundary Surface «Heavy Liquid Metal Coolant – Constructional Material» with «Express Freezing» Method\A.V. Beznosov, T.A. Bokova, K.A. Makhov, A.I. Shumilkov, Yu.N. Drozdov, V.N. Puchkov, V.V. Makarov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 11 pages, 10 illustrations. – References, 1 title.*

Results of experimental research of boundary surface of constructional materials in the medium of high-temperature (550°C) heavy liquid metal coolants (HLMC) of perspective nuclear power installations of LFR type. It is shown that asperity of stainless surface changes considerably as a result of active insoluble impurity moving towards the «steel – coolant» interface that takes place during long-term HLMC circulation. It is shown that long-term passivation of steels in air medium at high temperatures (550°C) does not seriously influence on asperity alteration of its surfaces.