

УДК 621.039

А.В. Мамаев, С.М. Дмитриев, Р.Р. Рязанов, А.Е. Соборнов, А.В. Котин

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКРУЧЕННОГО ТЕЧЕНИЯ В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ С ВНУТРЕННЕЙ СПИРАЛЬНО НАВИТОЙ ТРУБОЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приводятся результаты трехмерного моделирования закрученного течения в кольцевом канале с внутренней спиральнонавитой трубой в пакетах прикладных программ вычислительной гидродинамики ЛОГОС и ANSYS CFX.

Ключевые слова: закрученные течения, спиральнонавитая труба, вычислительная гидродинамика, математическая модель, численное моделирование

Введение

Исследование особенностей процессов гидродинамики является важным этапом как при проектировании конструкций теплообменных аппаратов, так и на стадии обоснования эксплуатационных параметров и режимов работы ЯЭУ. Наиболее часто в инженерной практике возникает задача расчета гидродинамических характеристик течений в каналах, которая сводится к определению полей скорости и давления потока рабочей среды. Особое внимание вызывают внутренние закрученные течения жидкости и газа, которые ввиду своих специфических особенностей получили широкое применение в современном теплоэнергетическом оборудовании.

Данный тип течений характеризуется полем скорости с соизмеримыми значениями составляющих компонент. Наличие поперечных составляющих скорости обуславливает применение закрутки потока рабочих сред в каналах теплоэнергетических установок для достижения необходимой интенсификации протекающих в них тепло- и массообменных процессов [1, 2]. Одним из наиболее эффективных способов интенсификации теплообмена, основанных на закрутке потока, является использование каналов, выполненных по принципу «труба в трубе», с внутренней спирально навитой трубой.

Применение каналов такой конструкции в высоконапряженном теплообменном оборудовании, в частности в парогенераторном блоке ядерных энергетических установок малой мощности, обеспечивает интенсификацию процессов теплопереноса как со стороны греющей, так и нагреваемой сред, что позволяет существенно уменьшить массу и габариты установки и повысить технико-экономические показатели в целом [3]. Сложная структура течения в таких каналах, трудоемкость и высокие затраты на проведение модельных экспериментов, ограниченный характер существующих эмпирических зависимостей вызывают трудности при выборе наиболее рационального подхода для проведения гидродинамических расчетов.

Быстрый рост производительности многопроцессорных вычислительных систем делает возможным применение методов вычислительной гидродинамики (Computational fluid dynamics, CFD) для моделирования сложных течений, в частности закрученных потоков, что позволяет получить гидродинамические характеристики с приемлемой для практических целей точностью и избежать проведения дорогостоящих экспериментов. Существующие методы численного исследования процессов аэродинамики и тепломассообмена реализованы как в зарубежных, так и в отечественных программных средствах, и основаны на конкретных предположениях о структуре турбулентности, требующих проверки применительно к каждому отдельному классу исследовательских задач [4, 5].

В настоящее время ведущую роль в решении ряда практических задач атомной энергетики играют зарубежные программные коды. В сложившейся ситуации особенно важным является направление, связанное с разработкой, адаптацией и внедрением отечественных про-

грамм инженерного анализа в рамках импортозамещения, а также с целью создания конкуренции на мировом рынке.

Таким образом задача создания надежных расчётных моделей для анализа конкретного типа закрученных течений на базе CFD-технологий, реализованных в пакетах отечественного ПО, является весьма актуальной как с научной, так и с практической точки зрения.

Описание объекта и цели исследования

В качестве базы данных для верификации расчетной модели были использованы результаты экспериментального исследования гидродинамических характеристик однофазного потока воздуха в кольцевом канале, выполненном по принципу «труба в трубе» с внутренней спирально навитой трубой.

Экспериментальное исследование было проведено на стенде, входящем в состав научно-исследовательской лаборатории НГТУ им. Р.Е. Алексеева и представляющем собой аэродинамически разомкнутый контур, через который прокачивается воздух.

Экспериментальная модель, представленная на рис. 1, состоит из обсадной трубы 1 с внутренним диаметром 57 мм, оборудованной координатометром с установленным в нем термоанемометром 5 для замеров скорости и угла набегания потока, отборами статического давления 3 и 4 и специальным транспортиром с нитяным датчиком. Исследования проводились на модели с внутренним спирально навитыми вытеснителем 2 с наружным диаметром 40 мм и с шагом навивки 200 мм.

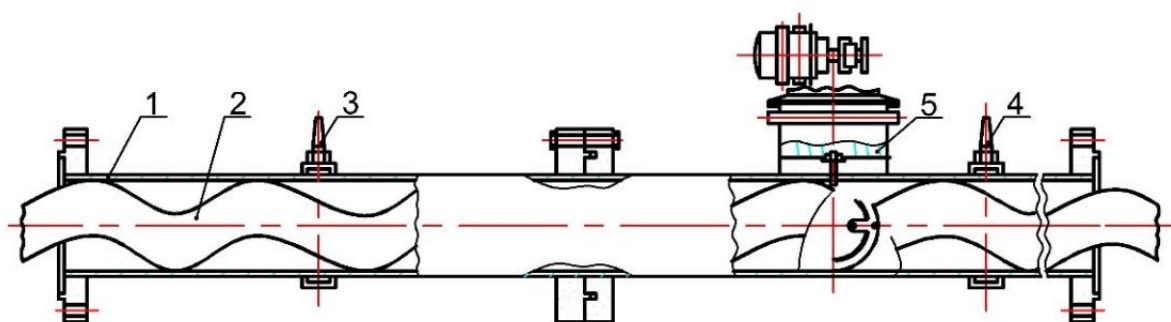


Рис. 1. Экспериментальная модель

В результате эксперимента были получены гидравлическое сопротивление канала и распределения осевой и тангенциальной составляющей скорости однофазного закрученного потока в диапазоне чисел $Re=4 \times 10^3 \div 10^5$. На рис. 2 приведена схема поперечного канала с обозначением азимутальных углов, в которых проводились замеры скорости потока. Отсчет по радиусу r канала производился от стенки внутренней трубы.

Целью исследования является оценка применения CFD-методов, реализованных в отечественном трехмерном коде ЛОГОС, для моделирования закрученного течения воздушного потока в кольцевом канале с внутренней спирально навитой трубой, а также разработка рекомендаций для построения надежных расчетных моделей, позволяющих получать решения с достаточной для инженерной практики точностью. В соответствии с целью можно выделить следующие задачи – это:

- разработка расчетной модели способной описывать структуру закрученного течения, реализованного в кольцевом канале с внутренней спирально навитой трубой;
- проведение численного исследования;
- оценка адекватности полученных результатов.

Для проведения расчетного исследования использовался отечественный код ЛОГОС 4.0.6, разработанный в Институте теоретической и математической физики Российского федерального ядерного центра (Саров). Создание расчетной модели также осуществлялось при

помощи коммерческого ПО ANSYS CFX 14, широко используемого на территории России и зарекомендовавшего себя эффективным инструментом для решения задач данного класса.

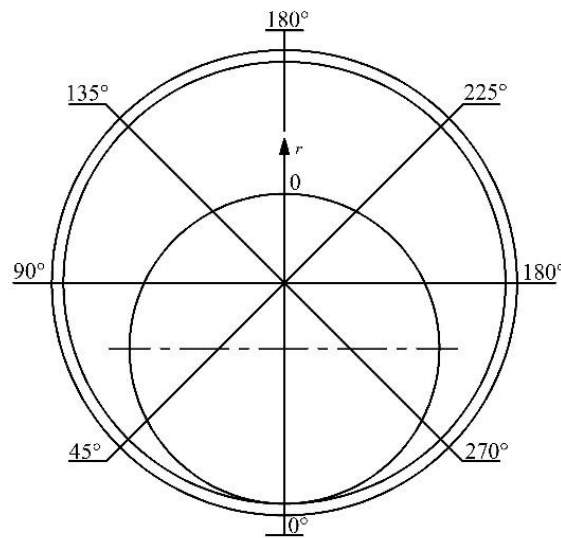


Рис. 2. Схема поперечного сечения канала с обозначением азимутальных углов

Математическая модель

В настоящее время одним из перспективных подходов к численному исследованию закрученных потоков является решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (Reynolds-averaged Navier–Stokes, RANS). В результате операции осреднения характеристики течения представляются в виде средней и пульсационной составляющих, а в уравнении движения появляются шесть новых неизвестных компонент, образующих тензор турбулентных напряжений Рейнольдса. Полученная система уравнений является незамкнутой, что требует введения дополнительных соотношений для ее разрешения. Одним из способов замыкания является использование полуэмпирических моделей, основанных на концепции о турбулентной вязкости [6]. В рамках данного подхода для анализа многих аэродинамических течений, ввиду своей относительной простоты и возможности получения достаточно точных результатов, положительно зарекомендовала себя однопараметрическая модель Спаларта-Аллмареса (SA).

Модель SA, как и все модели турбулентной вязкости, предполагает изотропный характер турбулентности, что не всегда позволяет учесть возникающие при закрутке потока эффекты без введения специальных поправок. Модификация модели SA с поправкой на кривизну линий тока и вращение, получившая название SARC, имеет более широкий диапазон применения касательно задачи анализа закрученных течений. Данная модель получила реализацию в программном коде ЛОГОС и была использована для проведения расчетов в данной работе.

Для замыкания уравнений Рейнольдса в ANSYS CFX была выбрана модель BSL RSM (Reynolds Stress Model BaseLine), использующая нелинейные соотношения для каждой из компонент тензора напряжений, что позволяет с помощью нее описывать структуру сложных течений, принципиально неразрешимую моделями турбулентной вязкости. Данная модель предполагает совместное решение уравнений, соответствующих модели Ментера $k-\omega$ BSL, и дополнительных дифференциальных уравнений переноса для Рейнольдсовых напряжений [7]. Повышенное требование к вычислительным ресурсам модели BSL RSM, по сравнению с моделью SARC, продиктовано необходимостью решения большего числа уравнений, что также негативно влияет на сходимость расчета в целом.

Расчетная модель

На начальном этапе разработки расчетной модели осуществлялась подготовка трехмерной геометрии исследуемого канала для дальнейшего построения расчетных сеток. Построение расчетной сетки на исходную геометрию усложнялось наличием большого числа некачественных элементов в области касания вытеснителя и обсадной трубы. Для достижения необходимого качества сеточной модели задача контакта двух поверхностей была упрощена: вдоль линии касания поверхностей была отсечена область. Размер отсеченной области продиктован условием соответствия элементов расчетной сетки основным критериям оценки ее качества.

Для построения сеточной модели был использован программный комплекс ANSYS ICEM CFD, предусматривающий трансляцию сетки из формата сеточного генератора в универсальный формат CGNS (CFD General Notation System). Формат CGNS поддерживается многими вычислительными пакетами, в том числе и кодом ЛОГОС.

Для моделирования закрученных течений предпочтительным является использование гексаэдрических блочных сеток, так как при этом линии тока и сеточные линии ориентированы одинаково. Применение неструктурированных тетраэдрических сеток той же размерности вызывает потерю точности решения, а необходимое дополнительное измельчение расчетной области для достижения приемлемых результатов приводит к увеличению времени сходимости решения.

Выбранные для проведения расчета модели турбулентности не используют функцию стенки, что потребовало сгущения сетки у наружной и внутренней поверхности канала с толщиной первого элемента, соответствующей рекомендациям по выбору параметра $Y^+ \sim 1$. Построение сеточной модели осуществлялось для режима, соответствующего большей среднерасходной скорости, таким образом обеспечивалось необходимое значение параметра Y^+ для всех моделируемых режимов.

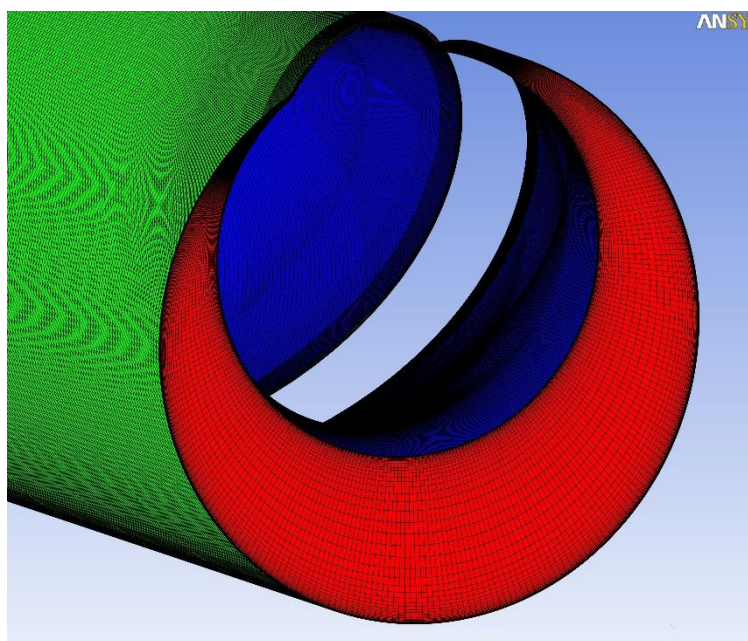


Рис. 3. Внешний вид гексаэдрической сетки

На основании упрощенной геометрии исследуемого канала была сгенерирована сеточная модель, содержащая 7,2 млн элементов и 6,9 млн расчетных узлов, с коэффициентом сгущения у стенки равным 1,2. Внешний вид разработанной гексаэдрической сетки представлен на рис. 3. Значительная размерность сеточной модели продиктована ее локальным измельчением, в связи с возрастающим затеснением канала в направлении к месту касания.

С целью экономии временных затрат наложение сетки производилось на геометрию, соответствующую l шагу навивки, с последующим копированием и склейкой для обеспечения необходимой длины расчетной модели.

На основании математической и сеточной была разработана расчетная модель течения идеального газа (воздуха), реализованная в программных пакетах ANSYS CFX И ЛОГОС. Расчеты проводились в стационарной постановке с использованием модели идеального газа (Air Ideal Gas) для описания свойств рабочей среды. Свойства среды, соответствующие эксперименту, были заданы плотностью и динамической вязкостью. Граничные условия задавались на соответствующих поверхностях геометрической модели исходя из режимных параметров экспериментальных исследований. На входе в расчетную область задавалась нормальная составляющая скорости, на выходе из расчетной области - относительное (избыточное) давление равное 0 кПа, на остальных поверхностях - условия непроницаемости и прилипания.

Результаты расчетного исследования

В результате численного исследования были получены поля скорости и давления в асимметричном кольцевом канале при течении закрученного потока воздуха. На основании полученных данных производилась оценка выбранных для проведения расчета моделей турбулентности, а также разработанной расчетной модели в целом.

1. Профили осевой и тангенциальной составляющей скорости.

Для сравнения с результатами эксперимента были построены распределения осевой и тангенциальной составляющей скорости в областях, соответствующих ее замеру. Для обеспечения наилучшей наглядности профили скоростей вывоились на диаграммы, повторяющие форму сечения канала. Профили относительных осевой и тангенциальной составляющей для среднерасходной скорости $\bar{v}=17,4$ м/с представлены на рис. 4 – рис. 5.

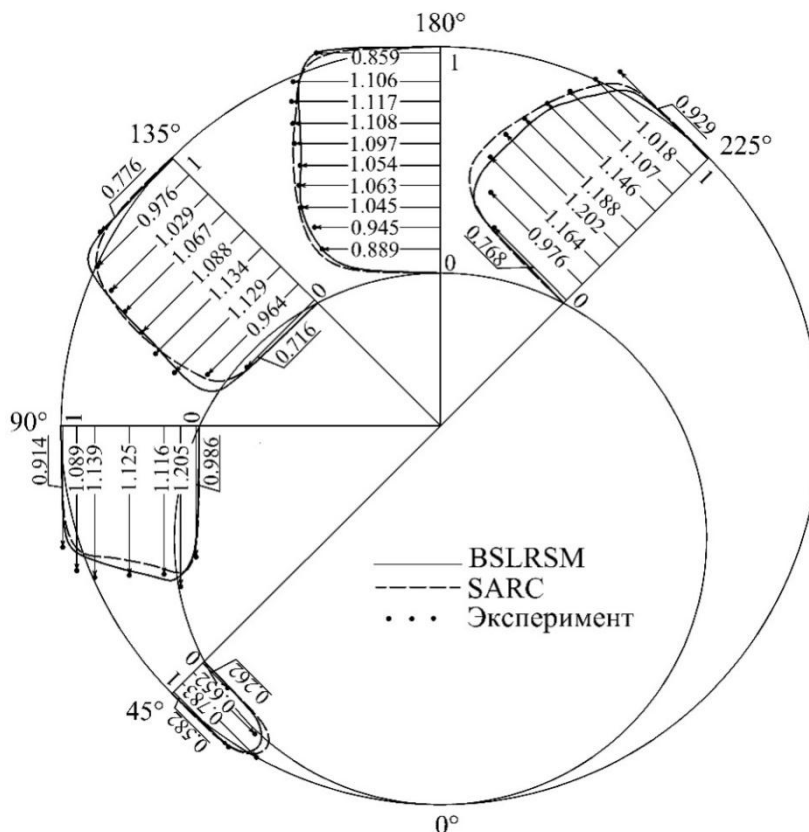


Рис. 4. Распределение осевой составляющей скорости по сечению исследуемого канала для среднерасходной скорости $\bar{v}=17,4$ м/с

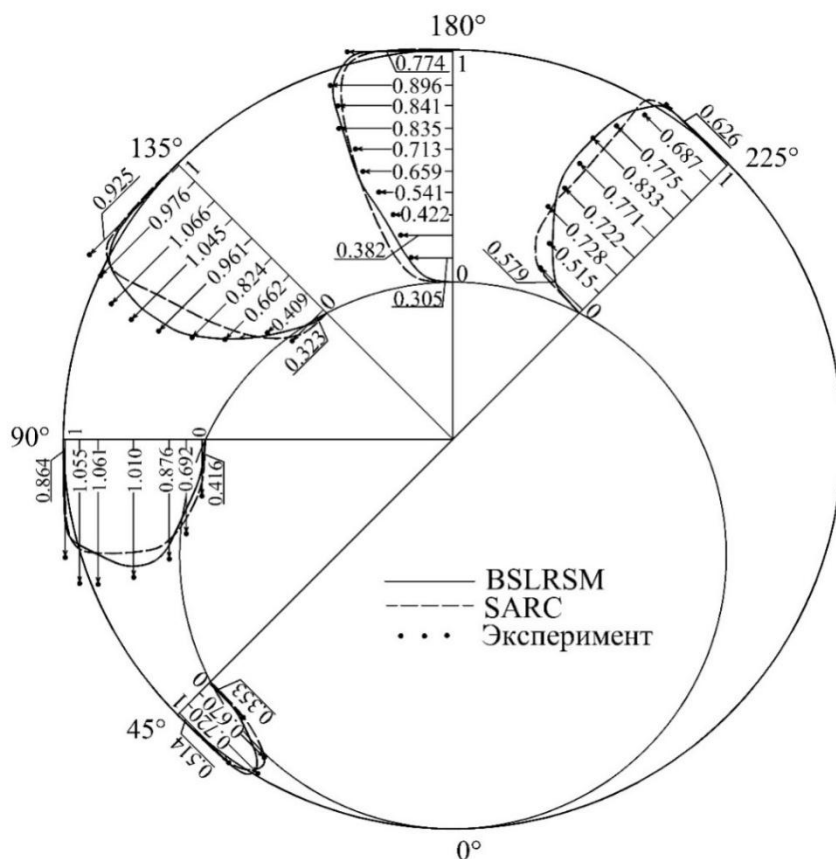


Рис. 5. Распределение тангенциальной составляющей скорости по сечению исследуемого канала для среднерасходной скорости $\bar{v}=17,4$, м/с

Наилучшее совпадение расчетных и экспериментальных профилей скорости в поперечном сечении канала получено для осевой составляющей, как при использовании модели SARC, так и модели BSL RSM. Важно отметить схожий характер распределений, полученных на обеих моделях. Качественные отличия расчетных профилей отмечаются на углах 135° и 225° , при этом ближе к экспериментальным данным находятся значения, соответствующие модели BSL RSM.

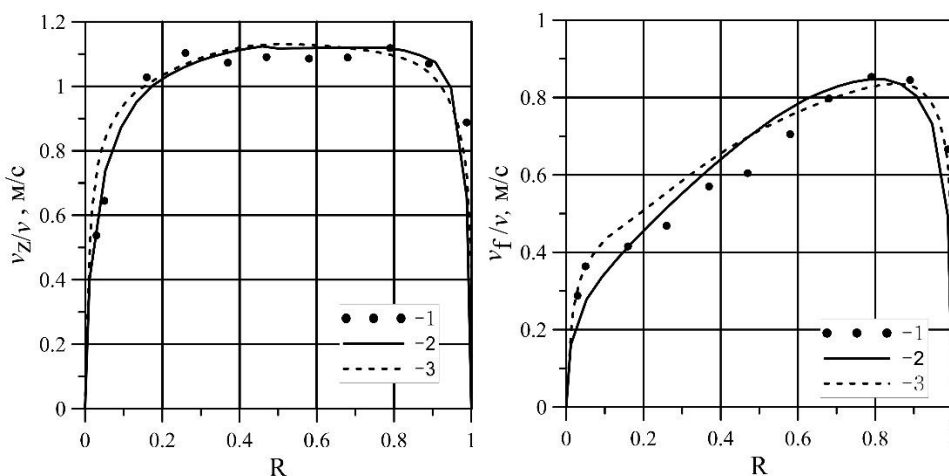


Рис. 6. Распределение в радиальном направлении канала для азимутального угла 180° и среднерасходной скорости $\bar{v}=11,8$, м/с:
 а – осевой составляющей скорости v_z ; б – тангенциальной составляющей скорости v_f ;
 1 - эксперимент; 2 - BSL RSM; 3 - SARC

Распределение скоростей в поперечном сечении канала является определяющим фактором, влияющим на теплообмен и гидравлическое сопротивление однофазных потоков в парогенерирующих каналах со спирально-навитой трубой, поэтому важным является точное моделирование закрученных течений в широком диапазоне режимных параметров. На рис. 6 – рис. 8 приведены расчетные и экспериментальные распределения относительных осевой и тангенциальной составляющих скорости для режимов, соответствующих различным значениям среднерасходной скорости \bar{v} , м/с, где R – относительный радиус.

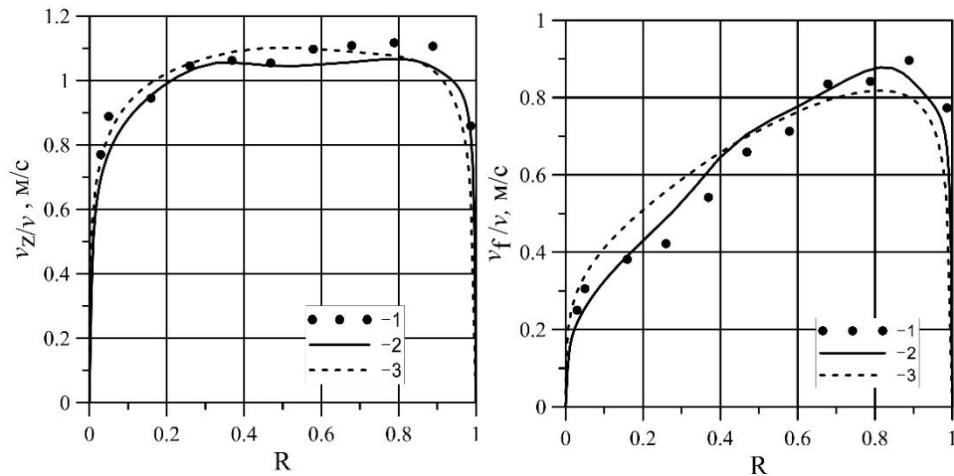


Рис. 7. Распределение в радиальном направлении канала для азимутального угла 180° и среднерасходной скорости $\bar{v}=17,4$, м/с:
 а – осевой составляющей скорости v_z ; б – тангенциальной составляющей скорости v_f ;
 1 - эксперимент; 2 - BSL RSM; 3 - SARC

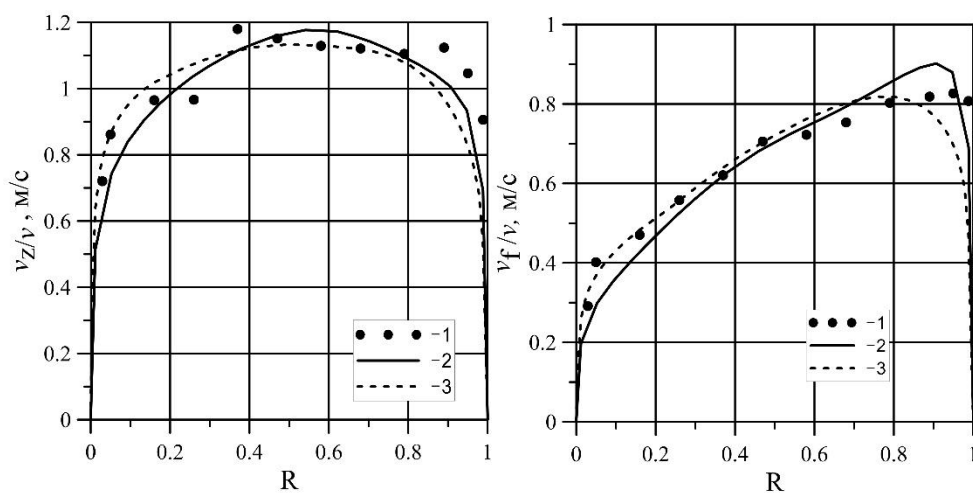


Рис. 8. Распределение в радиальном направлении канала для азимутального угла 180° и среднерасходной скорости $\bar{v}=22,3$, м/с:
 а – осевой составляющей скорости v_z ; б – тангенциальной составляющей скорости v_f ;
 1 - эксперимент; 2 - BSL RSM; 3 - SARC

В рассмотренном диапазоне изменения среднерасходной скорости расчетные распределения, полученные на обеих моделях турбулентности, качественно согласуются с экспериментальными данными. В пристенной области внутренней и наружной поверхности канала модель SARC дает соответственно незначительно завышенные и заниженные значения, по сравнению с BSL RSM, что наиболее ярко проявляется при увеличении среднерасходной скорости.

2 Гидравлическое сопротивление.

Большое внимание при проектировании теплообменных аппаратов, в каналах которых применяются закручивающие устройства, уделяется величине коэффициента гидравлического сопротивления ξ . Для определения ξ в результате численного моделирования были получены распределения статического давления по длине исследуемой модели. На рис. 9 представлены расчетные и экспериментальные зависимости ξ канала от числа Re.

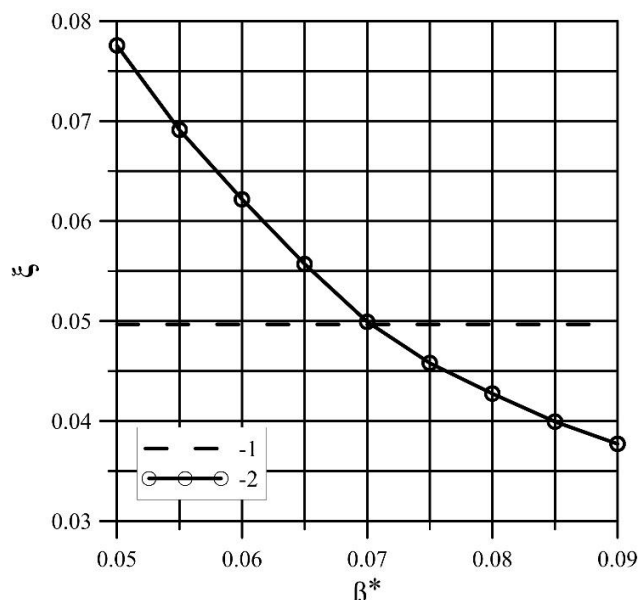


Рис. 9. Экспериментальные и расчетные зависимости коэффициента гидравлического сопротивления: 1 - эксперимент; 2 - BSL RSM; 3 - SARC

Для достижения необходимой точности расчета на модели BSL RMS производилось варьирование коэффициента β^* (BetaStar), входящего в соотношение корреляции давления и скорости деформации в уравнении для тензора турбулентных напряжений Рейнольдса и отвечающего за перераспределение энергии между компонентами тензора. Подбор необходимого значения коэффициента проводился для режима, соответствующего наибольшей среднерасходной скорости, в диапазоне изменения параметра: 0,05-0,09. Зависимость коэффициента β^* от ξ представлена на рис. 10.

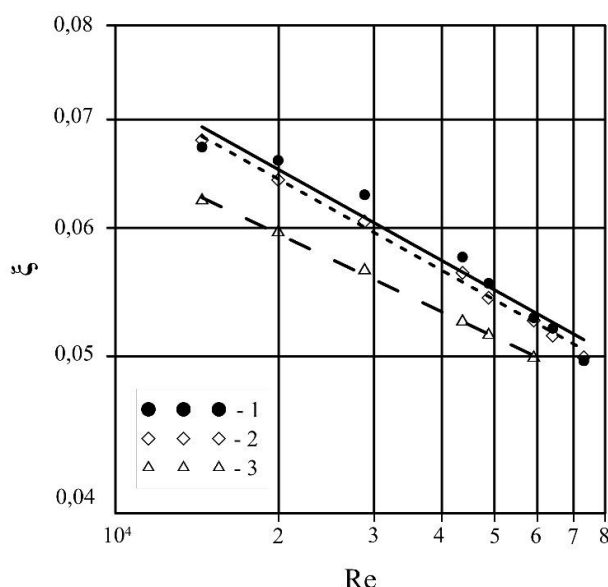


Рис. 10. Зависимость ξ от коэффициента β^* для среднерасходной скорости $\bar{v}=53,8$, м/с

Полученная зависимость ξ от коэффициента β^* , позволила определить его необходимое значение равное 0,07 и провести расчеты во всем диапазоне исследуемых режимов. В результате CFD-моделирования на модели BSL RMS были получены расчетные величины ξ , отличающиеся от экспериментальных, не более чем на 3%. Модель SARC также позволила получить приемлемые результаты: отклонение от эксперимента не превысило 8%.

Выводы

В результате численного моделирования были исследованы особенности течения в канале с внутренней спиральнонавитой трубой в программных пакетах ЛОГОС и ANSYS CFX. Разработка расчетной модели осуществлялась на основании сгенерированной тетраэдрической сетки, соответствующей требованиям к выбранным моделям турбулентности. Полученные в результате расчета поля скорости позволили построить профили ее осевой и тангенциальной составляющих по сечению канала в направлении различных азимутальных углов. Распределения скорости, полученные на моделях турбулентности RSM BSL и SARC, имеют схожий характер с качественным отличием, наблюдаемым на углах 130° и 225° . Обе модели показали наилучшее совпадение для осевой составляющей скорости. На основании распределений статического давления по длине канала были определены зависимости для коэффициента гидравлического сопротивления. Для достижения необходимой точности расчета был определен параметр β^* модели BSL RMS равный 0,07. Отклонение расчетных значений коэффициента гидравлического сопротивления от эксперимента составило: модель BSL RSM – не более 3%, модель SARC – не более 8%.

Достаточное согласование данных численного исследования, полученных на разработанной расчетной модели, с экспериментальными позволяет судить о ее применимости для описания течения в канале с внутренней спиральнонавитой трубой. В данной работе лучше себя показала модель BSL RSM, однако модель SARC также позволила получить удовлетворительные результаты. Кроме того, модель SARC, реализованная в программном пакете ЛОГОС, являясь менее требовательной к вычислительным ресурсам, гораздо выгоднее для проведения расчетов на мелких сетках. Таким образом с использованием кода ЛОГОС для проведения гидродинамических расчетов каналов с внутренней спиральнонавитой трубой, в особенности теплообменных каналов перспективных реакторных установок, возможно получение характеристик закрученных течений с достаточной для практических целей точностью.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0124 от 3 декабря 2014 г. (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

Библиографический список

1. **Щукин, В.К.** Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах / В.К. Щукин, А.А. Халатов. – М.: Машиностроение, 1982. – 200 с.
2. **Митрофанова, О.В.** Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок / О.В. Митрофанова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 288 с.
3. **Будов, В.М.** Форсированные теплообменники ЯЭУ / В.М. Будов, С.М. Дмитриев. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 176 с.
4. **Харламов, С.Н.** Алгоритмы при моделировании гидродинамических процессов / С.Н. Харламов. – Томск: ТПУ, 2008. – 80 с.
5. **Козелков, А.С.** Математические модели и алгоритмы для имитационного моделирования задач гидродинамики и аэродинамики: учеб. пособие / А.С. Козелков [и др.]; НГТУ. – Нижний Новгород, 2014. – 164 с.

6. **Снегирёв, А.Ю.** Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений / А.Ю. Снегирёв. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 143 с.
7. ANSYS CFX Solver Modeling Guide / ANSYS Inc. – ANSYS CFX Release 15. – 2013.

*Дата поступления
в редакцию 25.10.2015*

A. V. Mamaev, S. M. Dmitriev, R. R. Ryazapov, A. E. Sobinov, A.V. Kotin

**NUMERICAL SIMULATION OF SWIRLING FLOW IN THE RING-
THE FIRST CHANNEL WITH AN INNER PIPE SPIRIDONOVICH**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alexeev

The scientific paper presents the results of three-dimensional modelling of swirling flow in annular channel with an inner pipe Spiridonovich in the software of computational fluid dynamics LOGO and ANSYS CFX.

Key words: swirling flow, Spiridonovich pipe, computing guide-urodinamiki, mathematical model, numerical simulation