

СТРУКТУРА ОСРЕДНЕННОГО ТЕЧЕНИЯ И МАССООБМЕНА В ПЛОТНОМ ПУЧКЕ ОРЕБРЕННЫХ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ГАЗООХЛАЖДАЕМОГО РЕАКТОРА

А.А. Дунайцев
В.И. Солонин

adunaitsev@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Приведены результаты моделирования течения газа в плотном пучке, состоящем из 37 оребренных имитаторов тепло выделяющих элементов, заключенных в шестигранном чехле, характеристики экспериментального стенда, физической модели рабочего участка, системы и методики измерений. Описана методика построения расчетных сеток для решеток стержней с использованием преимущественно гексагональных элементов. Проанализированы распределения средних скоростей, температуры, статического давления, потерь на трение в пучке, полученные из результатов численного моделирования и измеренные в физическом эксперименте с локальным подогревом потока на входе в пучок и части имитаторов стержней. Показано, что расхождения расчетных и экспериментальных данных по характеристикам течения связаны с геометрическими отклонениями трактов физической модели от номинальной геометрии трактов, использованной в расчетах. Сделан вывод о возможности использования SST-модели турбулентности для моделирования плотных пучков оребренных тепло выделяющих элементов

Ключевые слова

Гидродинамика, массообмен, пучок стержней, ячейка, канал, численное моделирование, вычислительная гидродинамика, стержневой тепло выделяющий элемент, локальный нагрев, интенсификация теплообмена, скорость, температура, потери на трение, статическое давление

Поступила в редакцию 03.10.2016
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Введение. Возрастающий интерес к разработке газоохлаждаемых реакторов для автономного электроснабжения [1] повышает актуальность исследования современных трехмерных моделей турбулентного течения и теплообмена для обоснования теплогидравлических характеристик их активных зон [2, 3].

Требования референтности используемых в разработках моделей турбулентности определяют необходимость выполнения физического эксперимента в условиях подобию теплогидравлическим процессам, протекающим в трактах газоохлаждаемого реактора. Результаты экспериментов являются базой для валидации кода. Исследования гидравлических и массообменных процессов выполнены на модели, содержащей пучок из 37 имитаторов тепло выделяющих элементов (ТВЭЛОВ) с номинальным относительным шагом треугольной решетки 1,096 мм, дистанционированных четырехзаходной навивкой (ребро по ребру) с относительным шагом навивки ребер 17,875 мм. Результаты экспериментов при

течении в модели изотермического или слабо неізотермического потока воздуха, создаваемого на входе в модель или за счет нагрева части имитаторов стержней, сравниваются с таковыми для численного моделирования.

Условия физического эксперимента. Моделировали фрагмент активной зоны с регулярной треугольной решеткой плотноупакованных оребренных стержней. Диаметр стержней модели 25 мм, гидравлический диаметр регулярных ячеек 8,1 мм. Модель содержала 37 стержней, ограниченных шестигранным чехлом. При относительном шаге стержней в треугольной решетке менее 1,15 мм измерить характеристики потока в объеме пучка зондами-щупами, движущимися вдоль рядов стержней, невозможно, поэтому в эксперименте ограничились измерениями в области выходного сечения пучка зондами, заглубленными в каналы пучка на 10 мм. Измерительные зонды диаметром 1 мм, выполненные в виде трубки Прандтля (для измерения статического давления в потоке), трубки Пито (для измерения динамического напора потока), термопары имели длину 135 мм и крепились в траверсе механизма перемещения диаметром 6 мм, что исключало возмущение потока в области измерений. Измерительные зонды перемещались программируемым механизмом по ломаной (рис. 1), соединяющей центры регулярных ячеек, расположенных вдоль рядов стержней. Шаг перемещения составлял 0,989 мм, что соответствует 16 точкам на прямом отрезке ломаной линии. На одной из граней чехла модели выполнены 26 отверстий диаметром 1мм для измерения статического давления потока на внутренней поверхности грани чехла. Шаг между отверстиями 60 мм.

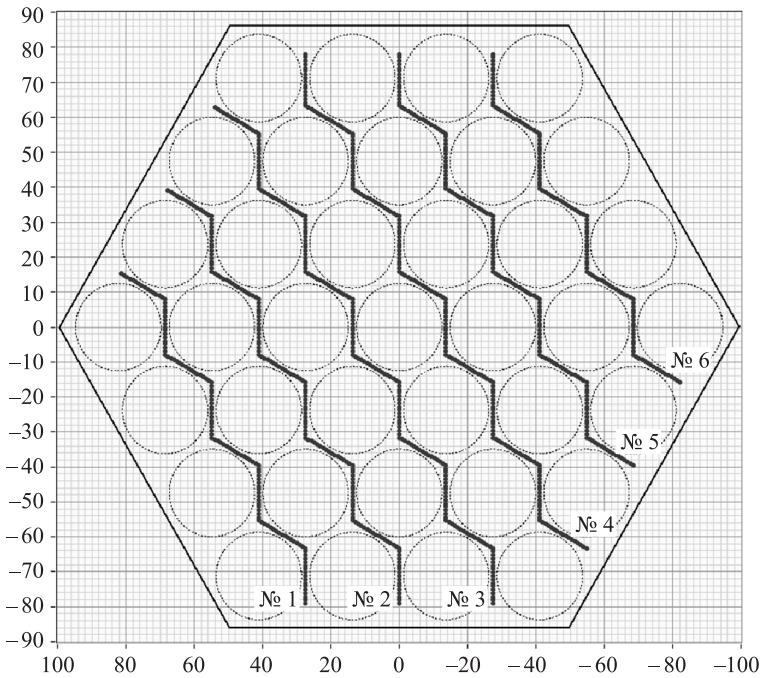


Рис. 1. Выходное сечение модели из 37 стержней в шестигранном чехле: № 1–№ 6 — номера траекторий (маршрутов) измерительных зондов

Пучок оребренных стержней модели имел высоту 1390 мм (55,6 диаметра стержней), высота чехла 1515 мм, расстояние от выходного торца пучка до выходного торца чехла 125 мм. Пучок собирался установкой нижних хвостовиков в входную решетку, имеющую шаг перфорации под хвостовики 27,4 мм. Диаметр проволоки четырехзаходной дистанционирующей навивки 1,2 мм. Внутренний размер чехла «под ключ» $172,2 \pm 1$ мм. При опирании периферийных стержней на поверхность чехла среднее значение зазоров между ребрами в области контакта ребро по ребру составляет 0,2...0,47 мм. Реальная геометрия выходного сечения 37-стержневой модели сравнивается на рис. 2 с номинальным положением стержней и ребер в этом же сечении. Видно, что отклонения осей стержней от номинала достигают ~ 2 мм, а ориентации положения дистанционирующей проволоки — $\sim 15^\circ$ угловых. Для сечений за входной решеткой (до ~ 300 мм от решетки) зазоры между стержнями близки к номинальным. Отклонение геометрии пучка от номинальной связано с погрешностями шага навивки ребер, размера чехла, кривизной стержней.

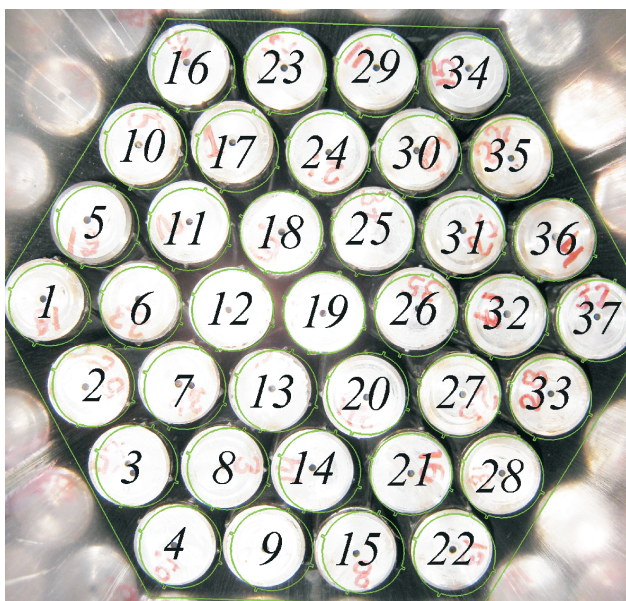


Рис. 2. Выходное сечение модели и номинальное расположение стержней в чехле

Поток перед пучком модели формировался коаксиальным входным устройством, имеющим форму конического конфузора, что позволяло получать равномерные в сечении входа в пучок скорости подогреваемого центрального и кольцевого периферийного потоков.

Четыре периферийных стержня модельного пучка (16, 23, 29, 34, см. рис. 2) имели встроенные электронагреватели, располагавшиеся на расстоянии 271 мм от входа в пучок, высота нагреваемой части составляла 900 мм. Мощность каждого электронагревателя 394 Вт, распределение энерговыделения по высоте равномерное и составляло 4,38 Вт/см.

Сигналы датчиков давления на стенке чехла от зондов Прандтля, Пито, а также ЭДС термопары оцифровывались с частотой дискретизации 1 кГц и записывались ПЭВМ в течение времени осреднения сигналов (единицы секунд), что обеспечивало как представительность измерений, так и приемлемую продолжительность экспериментов. Обработка сигналов выполнялась ПЭВМ с применением разработанного программного обеспечения.

Расчетная модель и генератор сеток. Для количественного описания течений жидкости и газа с теплообменом используется система уравнений, включающая в себя уравнения сохранения массы, импульса и энергии [4–6]. Для замыкания системы уравнений осредненного турбулентного течения использовалась стандартная SST-модель [6–8], включающая в себя уравнения турбулентной кинетической энергии, удельной скорости диссипации энергии турбулентности, турбулентную кинематическую вязкость, выраженную через кинетическую энергию и скорость диссипации энергии турбулентности, турбулентное число Прандтля и рекомендуемый набор эмпирических коэффициентов в замыкающих уравнениях.

Стандартная SST-модель турбулентности хорошо себя зарекомендовала в расчетах течений в пучках стержней и показывает хорошую корреляцию характеристик потока, полученных на трехмерных расчетных моделях и измеренных в экспериментах [9, 10]. Систему уравнений решали методом контрольного объема [11].

Расчетную сетку для проточной части пучка и оболочек стержней строили в сеточном генераторе собственной разработки. Генератор не требует подготовки трехмерной CAD-модели и строит сетку по геометрическим параметрам стержней и их дистанционатора. Участки расчетных сеток приведены на рис. 3. Сетки для проточной части пучка и оболочки стержней включают в себя преимущественно гексагональные элементы. Как показывает практика, на гексагональной структурированной сетке задача сходится быстрее, что соответствует рекомендациям программного пакета CFX. В небольшом количестве использованы призматические и имеющие форму пирамиды элементы. Последние только вблизи навивки для описания смещения проволоки на одну или несколько ячеек в направлении навивки при переходе от одного расчетного слоя к другому вдоль стержня. Сетка строится методом протягивания вдоль оси Z со смещением внутренних слоев на одну или несколько ячеек в направлении навивки. Внешняя сторона регулярной шестигранной ячейки, построенной вокруг стержня, содержит только гексагональные элементы и позволяет стыковаться таким ячейкам «узел в узел». В итоге сетка для проточной части пучка получается цельной и не требует использования дополнительных интерфейсов. Сеточный генератор хорошо оптимизирован и использует принцип параллельных вычислений. Построение таких сеток (суммарное число элементов сеток ~ 40 млн) занимает чуть больше 15 мин и не требует больших затрат оперативной памяти. Вышеперечисленное свидетельствует о большом преимуществе использования подобных «самописных» генераторов сеток для решения задач численного моделирования по сравне-

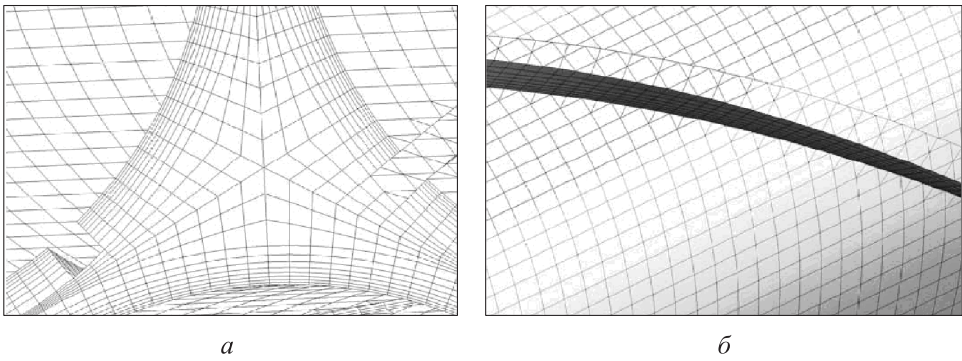


Рис. 3. Расчетные сетки для проточной части пучка (а) и оболочки стержня (б)

нию с универсальными автоматическими генераторами тетрагональных сеток [12], которые требуют больших затрат машинного времени и оперативной памяти как при построении таких сеток, так и непосредственно при численном моделировании. Опыт использования универсальных генераторов тетрагональных сеток с помощью компьютера аналогичной производительности показывает, что время построения сетки для 37-стержневого пучка с навивкой при условии, что размеры элементов близки к размерам тетрагональной сетки составляет ~ 8 ч. На гексагональных сетках в ANSYS CFX статическая задача турбулентного дозвукового течения в канале сложной формы без химических реакций и фазовых переходов сходится до уровня невязок порядка 10^{-4} за 20...50 итераций. Для тетрагональных сеток это значение, как правило, находится в диапазоне 150...300 итераций.

Теплофизические свойства воздуха и алюминия принимались по данным работ [13, 14].

Для численного моделирования изотермического потока в качестве граничных условий задавались атмосферное давление воздуха на выходе из чехла модели и расход (0,517 кг/с) с равномерным распределением скорости на входе в пучок. На поверхности стержней и чехла задавались граничное условие твердой изотермической (в экспериментах без подогрева) стенки и условие прилипания. При моделировании эксперимента с подогревом потока расчет проводился для двух вариантов: с учетом переноса теплоты через алюминиевую оболочку стержня (толщина оболочки 2 мм, теплопроводность алюминия 237 Вт/(м·К)) и без учета. В расчетах с нагревом стержней задавался тепловой поток на поверхностях оболочки стержня (на внутренней 6,55 кВт/м² и внешней 5,6 кВт/м²). В расчетах с подогревом центрального потока на входе его температура составляла 341 К, а периферийного 321 К.

Сравнение результатов расчета и эксперимента. Экспериментальные значения распределений статического давления вдоль пучка на расстояниях более 130 мм от входа до выходного сечения линейны и в исследованном диапазоне чисел Рейнольдса $(1,4...3,5) \cdot 10^4$ обобщены зависимостью $\lambda = 0,276\text{Re}^{-0,25}$ с предельным отклонением 13 % и погрешностью аппроксимации 1,7 %. Расчет по

результатам моделирования коэффициента трения для $Re = 2,38 \cdot 10^4$ дал значение 0,0255. Соответствующие экспериментальные значения лежат в диапазоне $0,0226 \pm 0,0025$. Таким образом, расчетные значения коэффициента гидравлического сопротивления превышают экспериментальные в среднем на 13 %, что можно объяснить наличием в исследованном пучке (см. рис. 2) ячеек для потока с большими, чем номинал, геометрическими размерами.

Расчетные значения λ практически совпадают с рекомендацией [15] для гладких пучков круглых стержней, что позволяет характеризовать течение в плотном пучке оребренных стержней с большим шагом оребрения как гидравлически близкое течению в пучке гладких стержней аналогичной геометрии.

Согласно измерениям трубкой Пито, статические давления в ячейках теплоносителя в плоскости, отстоящей на 10 мм от сечения выхода из пучка, ниже атмосферного. Статические давления в периферийных ячейках составляют $-1,0 \dots -1,13$ кПа, в центральных ячейках — $-0,9 \dots -1,0$ кПа. Согласно расчетам, статическое давление в этом же сечении лежит в диапазонах $-0,8 \dots -0,87$ кПа в периферийных ячейках и $-0,7 \dots -0,77$ кПа в центральных. Картина распределения статического давления обладает центральной симметрией. Расчеты показывают, что распределение статического давления в сечении ячеек неравномерное, что связано с влиянием дистанционирующей навивки. Этим и погрешностью позиционирования можно объяснить большой разброс статического давления в экспериментах. Систематическая погрешность экспериментального определения статического давления оценивается величиной ~ 10 % и может быть объяснена отклонением реальной геометрии пучка от номинальной и влиянием поперечных компонент турбулентных пульсаций скорости [16].

Экспериментальные распределения средней скорости в изотермическом потоке вдоль маршрутов 1, 2, 3 (см. рис. 1) приведены на рис. 4. По оси абсцисс графиков отложены номера точек измерений скорости, а вертикальные линии на графиках соответствуют точкам излома маршрутов (геометрическим центрам ячеек пучка). Как правило, скорости в регулярных ячейках близки, а в зазорах между стержнями различаются значительно. Разность минимальных значений составляет примерно 25 м/с, что можно объяснить искажением геометрии пучка, в том числе расположением ребер в сечении, где проводились измерения.

В табл. 1 приведены результаты анализа влияния реальной геометрии ячеек (см. рис. 2) на отклонение экспериментальных и расчетных величин (см. рис. 4) для маршрута 1. Положение ребер при анализе — поворот на $\sim 5^\circ$ (угловых) по ходу часовой стрелки от положения на рис. 2.

Аналогичный анализ для остальных маршрутов показывает, что большинство отклонений определены различием реальной и номинальной геометрии пучка. Однако имеются и аномальные расхождения, которые предположительно объясняются зацеплением измерительного зонда за ребра стержней, что приводит к регистрированию близких значений скорости в нескольких точках положения координатника.

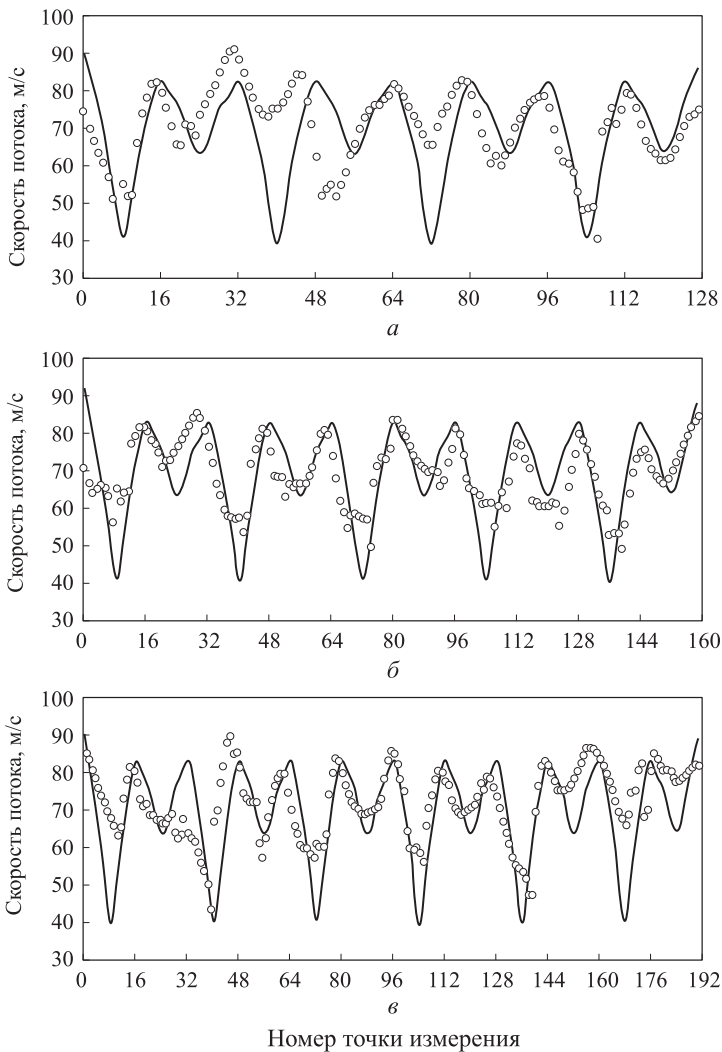


Рис. 4. Результаты измерения средней скорости потока вдоль маршрутов 1–3 (а–в):
 — — численное моделирование, о — эксперимент

Влияние отклонения геометрии ячеек от номинальной на распределение скорости на маршруте 1

Область точек измерения	Отклонение геометрии ячеек	Отличие скорости, измеренной в эксперименте, от расчетной
20–35	Отклонение шагов в ячейке между стержнями 1, 5, 6 в большую сторону, увеличение гидравлического диаметра ячейки	Завышение максимума на 8,4 %
35–48	Отклонение шага между стержнями 1 и 6 в большую сторону, увеличение проходного сечения	Завышение минимума на 82 %

Область точек измерения	Отклонение геометрии ячеек	Отличие скорости, измеренной в эксперименте, от расчетной
40–50	Увеличение гидравлического диаметра ячейки между стержнями 2, 6, 7	Завышение максимума на 6,3 %
50–56	Отклонение шага между стержнями 2 и 7 в меньшую сторону, уменьшение проходного сечения	Занижение минимума на 17,5 %
64–80	Ребра стержней 7 и 3 на маршруте 1 разведены дальше, чем должны быть по номиналу, увеличение проходного сечения	Завышение минимума на 62,5 %

При подогреве части потока, формируемого входным устройством, подогретый поток заполнял шесть регулярных ячеек вокруг центрального имитатора стержня (19, см. рис. 2). Распределение температур потока 10 мм от выходного среза пучка вдоль маршрутов 2–5 (см. рис. 1) приведено на рис. 5. Расчетные температуры в области центрального потока (маршруты 3 и 4) с учетом переноса теплоты теплопроводностью через оболочки стержней в среднем на ~4 К меньше, чем для расчетов без учета теплопроводности оболочек стержней. Для области границы между центральным и периферийным потоками (маршруты 5) максимальные температуры в потоке с учетом и без учета переноса теплоты теплопроводностью через оболочки стержней близки. При приближении к граням чехла модели на маршруте 5 температуры потока, рассчитанные с учетом теплопроводности через оболочки стержней, больше на ~2 К, чем без учета теплопроводности. Расчетные температурные распределения вдоль всех маршрутов немонотонны, имеют локальные максимумы, расположенные в области ячеек для потока (на границах трех стержней). Распределения расчетных температур вдоль маршрутов 2 и 5, 3 и 4 зеркально одинаковы, что является следствием конвективного переноса температурной неоднородности дистанционирующей навивкой стержней, имеющей противоположное направление вдоль симметрично расположенных маршрутов. Для условий анализируемого течения в пучке плотных стержней теплопроводность стержней играет важную роль, сравнимую с конвективным теплопереносом, инициированным дистанционирующей навивкой стержней. Экспериментальные распределения температуры (см. рис. 5) характеризуются приблизительно зеркальной симметрией при неодинаковых значениях температур вдоль симметричных маршрутов (2 и 5, 3 и 4). Измеренные значения температур в полной мере отражают влияние неидентичных трактов реальной геометрии модели на процессы конвективного переноса в пучке стержней. В области центрального потока в модели экспериментальные распределения лучше соответствуют расчетным, полученным с учетом теплопроводности через оболочки стержней.

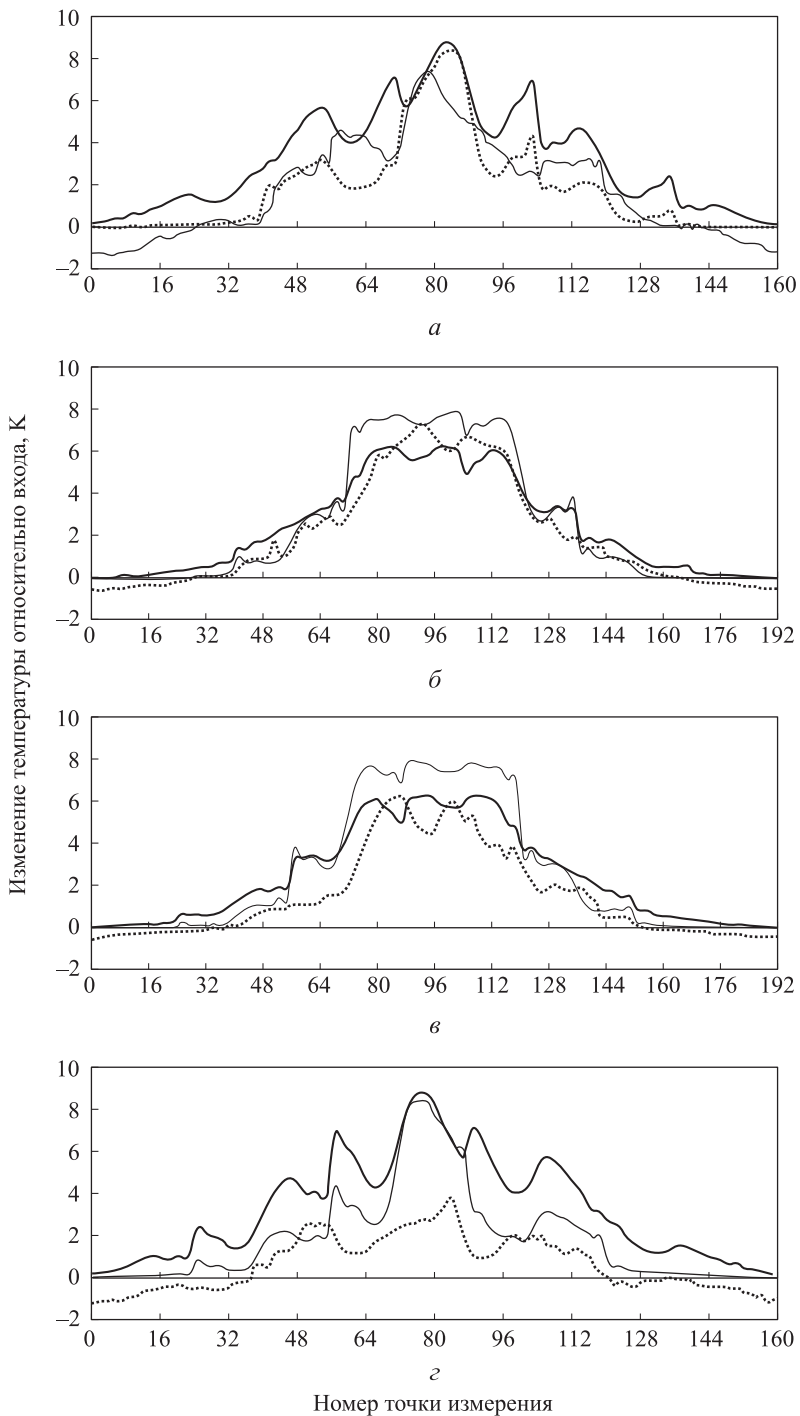


Рис. 5. Изменение температуры вдоль траектории измерительного зонда в эксперименте с тепловым следом на маршрутах 2–5 (а–г):

— и — — численное моделирование с учетом и без учета теплопроводности оболочки стержня; — эксперимент

При электрическом нагреве стержней 16, 23, 29, 34 (см. рис. 2) модельного пучка температура потока воздуха увеличивается в окрестности стержней, как это видно на рис. 6. Отрицательные значения температур на маршрутах 3, 4 связаны с различием температур потоков, подаваемых в периферийную и центральную области.

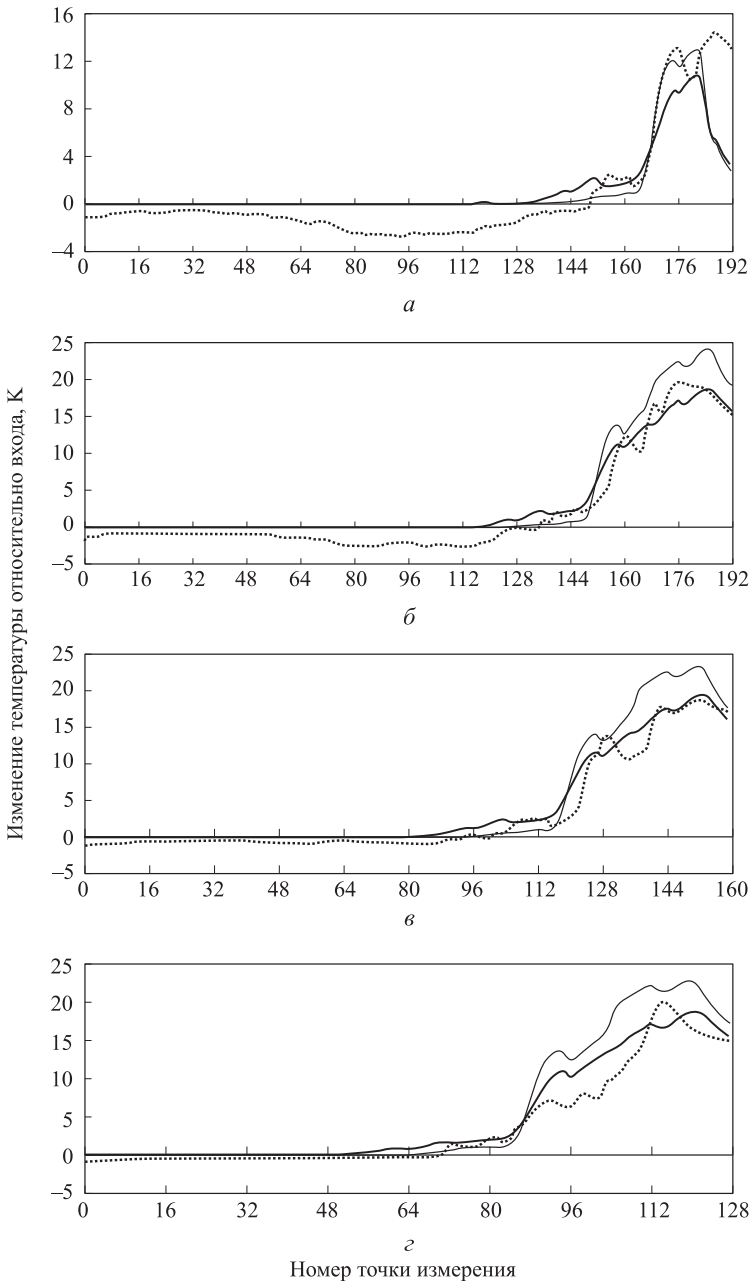


Рис. 6. Результаты измерения температуры на маршрутах 3–6 (а–г):

— и — — численное моделирование с учетом и без учета теплопроводности оболочки стержня;
 — эксперимент

Сравнивая результаты расчетов (см. рис. 6), выявили, что в условиях моделирования учет теплопроводности стержней снижает температуру потока на 3...5 К при уровне максимальных повышений температур 15...24 К, приводит к расширению границ подогретого потока. Локальные максимумы температуры расположены в центральной области регулярных ячеек, а максимальные градиенты — в области зазоров между стержнями, где максимальна интенсивность конвекции, генерируемая ребрами [17]. Экспериментальные и расчетные данные лучше соответствуют результатам расчетов с учетом теплопроводности. Отличия геометрии модельных трактов от номинала приводят к различию экспериментальных данных и расчетов с учетом теплопроводности стержней в пределах до 3...5 К.

Заключение. Сравнивая результаты физического и численного моделирования осредненного течения и массопереноса в плотном 37-стержневом пучке оребренных твэлов с дистанционированием ребро по ребру выявили, что использование SST-модели турбулентности позволяет получить распределения средней скорости, температурной «метки» в потоке модельного теплоносителя (воздуха), гидравлическое сопротивление пучка стержней, хорошо соответствующие экспериментальным данным.

Проведен анализ влияния геометрических отклонений проточной части 37-стержневого пучка от номинала на различие локальных характеристик течения, полученных в экспериментах и расчетах, которые были выполнены для номинальной геометрии стержней и модели. Отклонения положения отдельных стержней, достигающее 7 % описанного диаметра стержня, отклонения шага навивки ребер, составляющего до 4 % номинального значения, вызывают отклонения средней скорости потока в области ячеек пучка в пределах 6...8 %, в области зазоров между стержнями — до 60...80 %. Указанные неоднородности скорости потока в модельной сборке имеют следствием отличие экспериментальных и расчетных распределений температурных разностей в пределах до 25 %. Все отклонения локальных экспериментальных и расчетных характеристик потока соответствуют геометрическим отклонениям проточной части модели.

Оребрение стержней, периодически изменяющее геометрию проточной части и интенсифицирующее поперечный массообмен через зазоры между стержнями, существенно влияет на распределение средней скорости потока в пучке стержней модели и на распределение температурной «метки», вводимой на входе в модель за счет подогрева части потока или в объеме модели за счет нагрева четырех стержней. В результате распределения средней скорости зависят от положения ребер, а распределения температуры немонотонны: локальные максимумы расположены в области ячеек тракта потока воздуха в пучке стержней, что свидетельствует о важной роли конвективного массопереноса оребрением.

Учет роли растечки теплоты по высокотеплопроводной оболочке электронагреваемых стержней на температурные распределения в модельной сборке показал, что изменения локальной температуры в потоке с учетом теплопроводности оболочки в области максимальных температур потока (~20 °С) со-

ставляют до -5°C , а в области периферийной части распространения тепловой «метки» до $+2^{\circ}\text{C}$. Поэтому для повышения интенсивности поперечного теплопереноса в сборках плотных пучков стержней с большим шагом оребрения можно рекомендовать использовать материал оболочек твэлов с высокой теплопроводностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адамов Е.О., Драгунов Ю.Г., Орлов В.В. и др. Машиностроение. Энциклопедия. Т. 24. Кн. 1: Машиностроение ядерной техники. М.: Машиностроение, 2005. 960 с.
2. Марков П.В., Солонин В.И. Гидродинамические особенности течения в пучках оребренных твэлов с увеличенным шагом дистанционирования // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2013. № 4. С. 60–70.
3. Марков П.В., Солонин В.И. Влияние способа дистанционирования на гидродинамику семистержневого пучка тепловыделяющих элементов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2013. № 1. С. 38–48.
4. ANSYS CFX solver theory guide. Release 16.0. ANSYS Inc. 2016.
5. Снегирёв А.Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 143 с.
6. Wilcox D.C. Turbulence modeling for CFD. DCW industries, 2006. 522 p.
7. Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 88 с.
8. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений. СПб.: Изд-во Балт. гос. техн. ун-та, 2001. 108 с.
9. Фомичев Д.В., Солонин В.И. Гидравлические характеристики пучков стержней тепловыделяющих сборок реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 2. С. 4–17. DOI: 10.18698/0236-3941-2015-2-4-17
10. Фомичев Д.В., Солонин В.И. Структура турбулентного потока в пучках стержней тепловыделяющих сборок реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 3. С. 4–16. DOI: 10.18698/0236-3941-2015-3-4-16
11. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
12. ANSYS meshing user's guide. Release 16.0. ANSYS Inc. 2016.
13. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. М.: Атомиздат, 1968. 485 с.
14. Варгафтик Л.П. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 352 с.
15. 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. М.: ИздАТ, 2010. 771 с.

16. *Абрамович Г.Н., Крашенинников С.Ю., Секундов А.Н.* Турбулентное смешение газовых струй. М.: Наука, 1974. 272 с.

17. *Дунайцев А.А., Солонин В.И.* Процессы массообмена в пучках оребренных стержней // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2016. № 1. С. 125–134.

Дунайцев Алексей Анатольевич — ассистент кафедры «Ядерные реакторы и установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Солонин Владимир Иванович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Ядерные реакторы и установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Дунайцев А.А., Солонин В.И. Структура осредненного течения и массообмена в плотном пучке оребренных тепловыделяющих элементов газоохлаждаемого реактора // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2017. № 2. С. 84–98.

DOI: 10.18698/0236-3941-2017-2-84-98

MEAN FLOW AND MASS EXCHANGE STRUCTURE IN DENSE BUNDLE OF FUEL RODS OF GAS-COOLED REACTOR

A.A. Dunaytsev

adunaitsev@mail.ru

V.I. Solonin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The study gives the results of simulating gas flow in a dense bundle consisting of 37 finned simulators of fuel rods enclosed in a hexagonal cover. The paper presents characteristics of the experimental stand, the physical work site model, the system and measurement techniques. We describe a method for constructing computational grids for rod arrays with mostly hexagonal elements. We analyzed the distribution of average velocity, temperature, static pressure, friction losses in the bundle. The distribution was obtained from the results of numerical simulation and measured in a physical experiment with local flow heating at the entrance to the bundle and some part of the rod simulators. Findings of the research show that the difference between the calculated and experimental data on the flow characteristics is due to the geometrical deviations of a physical model paths from the nominal path geometry used in the calculations. We draw the conclusion about the possibility of using SST turbulence model for simulating dense finned bundles of fuel rods

Keywords

Hydrodynamics, mass transfer, rod bundle, cell, channel, numerical simulation, computational fluid dynamics, fuel rod element spacing, local heating, heat transfer, heat exchange intensification, speed, temperature, friction loss, static pressure

REFERENCES

- [1] Adamov E.O., Dragunov Yu.G., Orlov V.V., et al. Mashinostroenie. Entsiklopediya. T. 24. Kn. 1: Mashinostroenie yadernoy tekhniki [Machine engineering. Encyclopedia. Vol. 24. P. 1. Nuclear engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. 960 p.
- [2] Markov P.V., Solonin V.I. Hydrodynamic characteristics of coolant flow in bundles of ribbed fuel rods located with increased pitch of spacing. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2013, no. 4, pp. 60–70.
- [3] Markov P.V., Solonin V.I. Influence of spacer type on fluid dynamics of 7-rod fuel assembly. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2013, no. 1, pp. 38–48.
- [4] ANSYS CFX solver theory guide. Release 16.0. ANSYS Inc. 2016.
- [5] Snegirev A.Yu. Vysokoproizvoditel'nye vychisleniya v tekhnicheskoy fizike. Chislennoe modelirovanie turbulentnykh techeniy [High-performance computations in applied physics. Numerical simulation of turbulent flows]. Sankt-Petersburg, SPbSTU Publ., 2009. 143 p.
- [6] Wilcox D.C. Turbulence modeling for CFD. DCW industries, 2006. 522 p.
- [7] Garbaruk A.V., Strelets M.Kh., Shur M.L. Modelirovanie turbulentnosti v raschetakh slozhnykh techeniy [Turbulence simulation in complex flotation calculations]. Sankt-Petersburg, SPbSTU Publ., 2012. 88 p.
- [8] Belov I.A., Isaev S.A. Modelirovanie turbulentnykh techeniy [Turbulent flow simulation]. Sankt-Petersburg, BGTU Publ., 2001. 108 p.
- [9] Fomichev D.V., Solonin V.I. Pin bundles hydraulic characteristics of the BREST-OD-300 wire-spaced fuel subassemblies. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2015, no. 2, pp. 4–17. DOI: 10.18698/0236-3941-2015-2-4-17
- [10] Fomichev D.V., Solonin V.I. Structure of turbulent flow in the pin bundles of the BREST-OD-300. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2015, no. 3, pp. 4–16. DOI: 10.18698/0236-3941-2015-3-4-16
- [11] Patankar S. Numerical heat transfer and fluid flow. CRC Press, 1980. 214 p. (Russ. ed.: Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 152 p.)
- [12] ANSYS meshing user's guide. Release 16.0. ANSYS Inc. 2016.
- [13] Chirkin V.S. Teplofizicheskie svoystva materialov yadernoy tekhniki [Thermophysical properties of nuclear engineering materials]. Moscow, Atomizdat Publ., 1968. 485 p.
- [14] Vargaftik L.P. Spravochnik po teploprovodnosti zhidkostey i gazov [Handbook on fluids and gases heat conductivity]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 352 p.
- [15] Kirillov P.L., Bobkov V.P., Zhukov A.V., Yur'yev Yu.S. Spravochnik po teplogidravlicheskim raschetam v yadernoy energetike. T. 1. Teplogidravlicheskie protsessy v YaEU [Handbook on thermohydraulic calculations in nuclear energetics. Vol. 1. Thermohydraulic processes in nuclear power plants]. Moscow, IzdAT Publ., 2010. 771 p.

[16] Abramovich G.N., Krasheninnikov S.Yu., Sekundov A.N. Turbulentnoe smeshenie gazovykh struy [Turbulent mixing of gas effluxes]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 272 p.

[17] Dunaytsev A.A., Solonin V.I. Mass exchange processes in bundle of rods with ribs. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii* [Engineering and Automation Problems], 2016, no. 1, pp. 125–134.


Dunaytsev A.A. — assistant of Nuclear Reactors and Installations Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Solonin V.I. — Dr. Sc. (Eng.), Professor of Nuclear Reactors and Installations Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Dunaytsev A.A., Solonin V.I. Mean Flow and Mass Exchange Structure in Dense Bundle of Fuel Rods of Gas-Cooled Reactor. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2017, no. 2, pp. 84–98.

DOI: 10.18698/0236-3941-2017-2-84-98

<p>А.Н. Полилов</p> <p>Экспериментальная механика композитов</p>	<p>В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышло в свет 2-е издание учебного пособия автора А.Н. Полилова</p>
	<p>«Экспериментальная механика композитов»</p> <p>Изложены научные основы экспериментальных исследований композитных материалов-конструкций. Обоснованы экспериментальные методы определения полного набора упругих и прочностных констант ортотропных композитов. Приведены методы исследования ползучести и высокоскоростного деформирования композитов, модели и критерии разрушения анизотропных волокнистых композитов с полимерной матрицей. Предложены энергетические критерии развития расслоений и расщеплений в композитах. Рассмотрено влияние концентрации напряжений на прочность композитных деталей. Представлены оригинальные модели разрушения композитов, а также расчетные методы, отличающиеся от стандартных.</p>
	<p>По вопросам приобретения обращайтесь:</p> <p>105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1 +7 (499) 263-60-45 press@bmstu.ru www.baumanpress.ru</p>