



СОЛОНИН

Владимир Иванович
доктор технических наук,
профессор кафедры
«Ядерные реакторы
и установки»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)



МАРКОВ

Павел Владимирович
аспирант кафедры
«Ядерные реакторы
и установки»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Гидродинамика сотовой решетки-интенсификатора, создающей конвективный перенос, для реакторных установок с водой под давлением

В.И. Солонин, П.В. Марков

Создана CFD-модель 19-стержневого пучка с сотовой решеткой-интенсификатором, создающей направленный конвективный перенос. Исследовано течение теплоносителя, формируемое каналами решетки. Проведены расчеты коэффициента гидравлического сопротивления (КГС) при различных числах Рейнольдса.

Ключевые слова: сотовая решетка-интенсификатор, вычислительная гидродинамика, модель турбулентности, коэффициент гидравлического сопротивления, водо-водяные реакторы под давлением.

The CFD-model of the 19-rods bundle with a mixing grid-intensifier, creating a directed convection transfer has been developed. The coolant flow field generated by the grid channels was investigated. Calculations of the hydraulic friction coefficient were performed at different Reynolds numbers.

Keywords: mixing grid-intensifier, computational hydrodynamics, turbulence model, hydraulic friction coefficient, pressurized water reactors.

Совершенствование ядерного топлива и топливных циклов, обоснование безопасной эксплуатации топлива в расширенном диапазоне эксплуатационных параметров при повышении тепловой мощности энергоблока и в режимах маневрирования мощностью — таковы в настоящее время важные требования потребителей. ОАО «ТВЭЛ» инициировало проведение НИОКР, направленных на разработку, обоснование и совершенствование ядерного топлива и активных зон действующих АЭС, проектируемых реакторных установок, включающих конструкторские, расчетные, экспериментальные, технологические работы, выполняемые с привлечением технических университетов.

Задача повышения тепловой мощности реакторных установок с водо-водяными реакторами под давлением (ВВЭР) может быть решена установкой в тепловыделяющие сборки (ТВС) перемешивающих решеток-интенсификаторов, выравнивающих энтальпию теплоносителя в наиболее теплонапряженных областях пучка тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОВ), увеличивающих значение критических тепловых потоков, что позволяет повысить надежность охлаждения активной зоны реактора.

Разработаны различные конструкции решеток-интенсификаторов, устанавливаемых между дистанционирующими пучок ТВЭЛОВ решет-

ками в области выхода потока из ТВС. Эти решетки не выполняют функций дистанционирования.

В ОАО «МСЗ» предложена новая конструкция решеток сотового типа для пучка ВВЭР-1000, которая выполняет функции интенсификатора и дистанционатора. На кафедре «Ядерные реакторы и установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана проведены испытания 19-ячеистых фрагментов нескольких вариантов таких решеток [1]. Результаты испытаний показали возможность при надлежащем исполнении ячеек решетки создать в пучке твэлов за решеткой наряду с диффузионным (обусловленным турбулизацией потока, вытекающего из решетки) конвективный (связанный с генерированными поперечными течениями) механизм выравнивания температурных неоднородностей в пучке твэлов.

Решетки, обеспечивающие значимый конвективный перенос в пучке твэлов, выполнены из двух типов ячеек, отличающихся между собой только направлением наклона (по или против часовой стрелки) пуклевко-каналов, создающих на внутренней и внешней поверхностях ячейки наклонные каналы (рис. 1). Выходное сечение каждой ячейки повернуто относительно входного на угол 60° (как это можно видеть на рис. 1), что создает в объеме решетки вне ячеек односвязную открытую для потока теплоносителя полость. Каждый тип ячеек располагается в плоских рядах, которые чередуются по сечению решетки. В исследуемой решетке, размещенной в пучке твэлов, часть теплоносителя движется вдоль поверхности твэлов внутри ячеек, а другая часть — в зазорах между ячейками. Теплоноситель, движущийся в ячейках, как показал анализ, получает тангенциальную составляющую скорости. Теплоноситель в зазорах между ячейками движется в сообщающихся между собой каналах переменной формы, геометрия которых может обеспечить тангенциальные составляющие скорости того же, что и внутри ячеек, направления.

Ячейки исследуемого варианта решетки выполнены с тремя пуклевками, ориентированными под углом $\pm 20^\circ$ к оси пучка, высота ячеек

30 мм. Внутренний диаметр ячеек (9,1 мм), форма образующих этот диаметр пуклевковок в поперечном и продольном направлениях выбрана таким образом, чтобы обеспечить дистанционирование пучка твэлов.

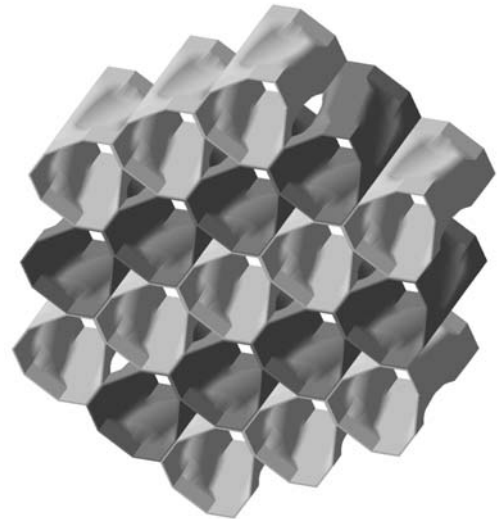


Рис. 1. Внешний вид 19-ячеистого фрагмента сотовой перемешивающей решетки

В экспериментах использованы 19-ячеистые фрагменты сотовых решеток (рис. 1) и 19-стержневой пучок оболочек твэлов (стержней) из циркониевого сплава Э-110, расположенных в узлах правильной треугольной решетки с шагом 12,72 мм, обеспечиваемым 19-ячеистыми фрагментами штатных дистанционирующих решеток ТВС ВВЭР-1000 высотой 20 мм, установленными на входе и выходе из пучка. Пучок стержней расположен внутри шестигранного канала с внутренним размером «под ключ» 57,4...59 мм. Диаметр стержней 9,1 мм, длина 1000 мм. Для определения коэффициентов гидравлического сопротивления (КГС) решетки она размещалась в сечении, отстоящем от входа потока в пучок после штатной концевой дистанционирующей решетки на ~ 560 мм вниз по потоку. Пучок продувался потоком воздуха с температурой $\sim 36^\circ\text{C}$ при плотностях массового расхода 60...100 кг/(с·м²). Числа Рейнольдса потока в пучке $\sim (3...4,5) \cdot 10^4$, что ниже, чем при течении теплоносителя в активной зоне ($Re \approx 5 \cdot 10^5$). Поток воздуха перед пучком формировался конфузорным входным участком, конструкция которого обеспечивала равномер-

ное распределение скорости по поперечному сечению.

КГС фрагмента сотовой решетки определялся по экспериментально измеренной (с шагом 50 мм) величине статического давления на кожухе шестигранного канала до и после фрагмента при соответствующем расходе потока. Согласно результатам экспериментов, КГС решетки, отнесенный к скоростному напору потока в пучке твэлов, вычисленному по среднему значению скорости в пучке, составил $1,09 \pm 0,02$. Влияние числа Рейнольдса на КГС не установлено.

С использованием программного комплекса STAR-CCM+ выполнено моделирование течения, инициализированного сотовой решеткой (рис. 1) в пучке стержней, размещенных в шестигранном чехле. Было принято, что решетка установлена на середине канала, образованного чехлом. Длины входного и выходного участков одинаковы и равны 500 мм. Роль штатных дистанционирующих решеток, расположенных на границах чехла, не учитывалась. На входе в пучок задавался равномерный профиль массовой скорости, на выходе — постоянство статического давления. Поверхности решетки, стержней и чехла принимались идеально гладкими, неподвижными, адиабатическими стенками.

Область решения разбивалась на контрольные объемы, значения искоемых переменных в центрах которых рассчитывались из балансного соотношения входящих и выходящих через боковые грани потоков [2]. Для решения задачи гидродинамики сотовой решетки в приближении несжимаемой вязкой турбулентной среды используются балансные уравнения количества движения, массы:

$$\rho \sum_j V_j \frac{\partial V_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \sum_j \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (1)$$

$$\sum_j \frac{\partial V_j}{\partial x_j} = 0, \quad (2)$$

где компоненты тензора напряжений и скоростей деформаций определяются как

$$\tau_{ij} = 2\mu S_{ij} + T_{ij}, \quad (3)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right). \quad (4)$$

С учетом того, что в объеме решетки течение теплоносителя происходит по криволинейным траекториям, имеет место анизотропия и закрутка потока; согласно рекомендациям [3], использована квадратичная $k - \varepsilon$ модель, в которой компоненты тензора турбулентных напряжений задаются следующим образом [4]:

$$\begin{aligned} T_{ij} = & 2\mu_T S_{ij} - 4C_1\mu_T \frac{k}{\varepsilon} \times \\ & \times \left[\sum_k S_{ik} S_{kj} - \frac{1}{3} \sum_k \sum_l S_{kl} S_{lk} \delta_{ij} \right] - \\ & - 4C_2\mu_T \frac{k}{\varepsilon} \left[\sum_k \omega_{ik} S_{kj} + \sum_k \omega_{jk} S_{ki} \right] - \\ & - 4C_3\mu_T \frac{k}{\varepsilon} \left[\sum_k \omega_{ik} \omega_{kj} - \right. \\ & \left. - \frac{1}{3} \sum_k \sum_l \omega_{kl} \omega_{kl} \delta_{ij} \right], \end{aligned} \quad (5)$$

где компоненты тензора завихренности

$$\omega_{ij} = \frac{\partial V_i}{\partial x_j} - \frac{\partial V_j}{\partial x_i}. \quad (6)$$

Кинетическая энергия турбулентности определяется из уравнения

$$\rho \sum_j V_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_T P - \rho \varepsilon, \quad (7)$$

$$P = \frac{1}{\mu_T} \sum_i \sum_j T_{ij} \frac{\partial V_i}{\partial x_j}. \quad (8)$$

Уравнение для скорости диссипации кинетической энергии:

$$\begin{aligned} \rho \sum_j V_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = & \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ & + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} \mu_T P - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon). \end{aligned} \quad (9)$$

Турбулентная вязкость:

$$\mu_T = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon}. \quad (10)$$

Коэффициенты квадратичной модели:

$$C_1 = \frac{C_{nl1}}{(C_{nl6} + C_{nl7} S^{*3}) C_\mu},$$

$$C_2 = \frac{C_{nl2}}{(C_{nl6} + C_{nl7} S^{*3}) C_\mu}, \quad (11)$$

$$C_3 = \frac{C_{nl3}}{(C_{nl6} + C_{nl7} S^{*3}) C_\mu},$$

$$C_\mu = \frac{C_{a0}}{C_{a1} + C_{a2} S^* + C_{a3} S^{*2}}, \quad (12)$$

$$S^* = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{2 \sum_i \sum_j S_{ij} S_{ij}}, \quad (13)$$

$$\omega^* = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{2 \sum_i \sum_j \omega_{ij} \omega_{ij}}.$$

Постоянные в выражения (7), (9), (11) и (12) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Постоянные квадратичной $k - \varepsilon$ модели

Константа	Значение	Константа	Значение	Константа	Значение
$C_{\varepsilon 1}$	1,44	C_{nl1}	0,75	C_{a0}	0,667
$C_{\varepsilon 2}$	1,92	C_{nl2}	3,75	C_{a1}	1,25
σ_k	1,0	C_{nl3}	4,75	C_{a2}	1
σ_ε	1,3	C_{nl6}	1000	C_{a3}	0,9
—	—	C_{nl7}	1	—	—

Важной отличительной особенностью программного комплекса STAR-CCM+ [5] является возможность автоматического построения многогранных сеток, что крайне важно ввиду сложной геометрии ячеек сотовой решетки, расположенной в пучке твэлов.

Расчетная область разделена на три участка: до решетки, область решетки, после решетки. Область решетки геометрически разделена на отдельные внутриячейные области (19 шт.) и межъячейное пространство. Для создания сеточной модели первых сгенерированы отдельные расчетные сетки, второго — одна сетка, после чего произведено их сопряжение.

Процесс создания сеточных моделей внутриячейных областей включает три этапа:

- получение твердотельных моделей из соответствующих моделей ячеек в графическом пакете КОМПАС-3D V10;
- создание поверхностных сеток в ПК STAR-CCM+;
- создание объемных многогранных сеток в ПК STAR-CCM+.

Характерный размер ячеек на поверхностях стержней и ячеек решетки — 0,5 мм. Прямолинейные входные и выходные участки длиной 4 мм получены равномерной экструзией из сетки на торцах ячейки, число слоев на каждом участке — восемь. Иллюстрация создания сетки для внутриячейной области ячейки центрального поля приведена на рис. 2.

Для создания сеточной модели межъячейного пространства, представляющего собой набор связанных криволинейных каналов, использован инструмент ПК STAR-CCM+ *Замыкание поверхности*. Этот инструмент позво-

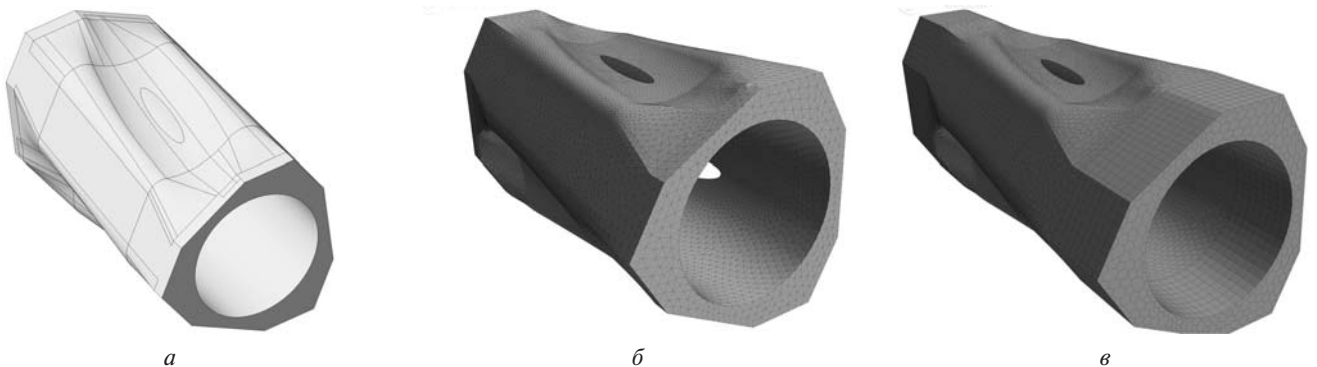


Рис. 2. Этапы создания сетки для внутриячейной области: а — твердотельная модель; б — поверхностная сетка; в — объемная сетка

ляет получить расчетную область, занимаемую жидкостью (рис. 3), из исходной твердотельной модели узла, что целесообразно, когда ручное ее создание в графическом пакете становится неэффективным. Характерный размер ячеек поверхностной сетки — 0,4 мм. Входной и выходной участки получены экструзией с пара-

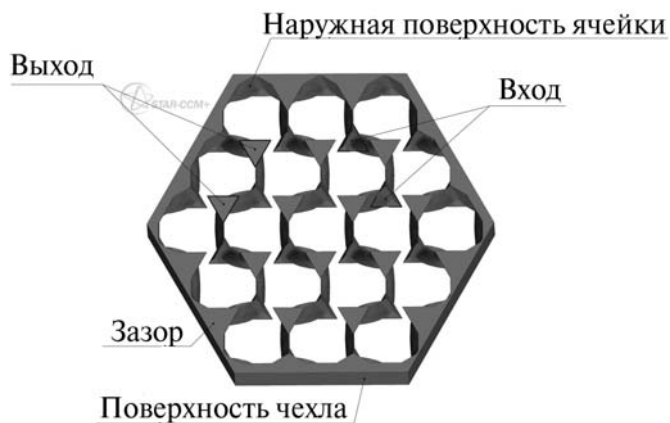


Рис. 3. Результат замыкания поверхности межячеистого пространства

метрами, аналогичными описанным ранее.

Входные и выходные участки, симметричные относительно средней плоскости решетки, образованы за счет зеркального отражения объемной сетки, полученной посредством экструзии из выходного сечения области, представляющей собой $1/4$ часть канала. При приближении к решетке произведено сгущение сеток в осевом направлении. Исходная твердотельная модель создана в графическом пакете КОМПАС-3D V10, последующие операции проведены в ПК STAR-CCM+. Характерный размер ячеек на границах — 1,0 мм. На поверхностях стержней и чехла образован призматический слой, толщина которого выбиралась из соображения корректного использования «пристеночных функций» [6]: $150 > y^+ > 30$, где y^+ — безразмерная координата центров ячеек в призматическом слое, зависящая в том числе и от параметров потока теплоносителя.

На финальной стадии создания расчетной сетки было осуществлено объединение сеточных моделей различных участков посредством внутренних интерфейсов. Сеточная модель 19-стержневого пучка для проведения

CFD-расчета, состояла из ~3 млн контрольных объемов. Расчетная область показана на рис. 4.

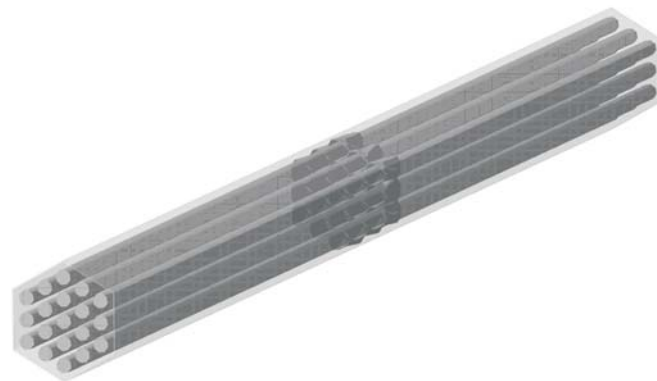


Рис. 4. Расчетная область

В расчетах моделировалось течение потоков воздуха и воды со средними скоростями 53 и 81 м/с для воздуха и 12 и 6 м/с — для воды, что соответствует изменению числа Рейнольдса течения в пучке стержней от $3 \cdot 10^4$ до $4,6 \cdot 10^5$ (табл. 2).

Таблица 2

Исходные данные для расчетов течения воздуха и воды в 19-стержневом пучке с сотовой решеткой

№	Теплоноситель	Скорость, м/с	Плотность, кг/м ³	Вязкость, Па·с	Re
1	воздух	53	1,16	$1,93 \cdot 10^{-5}$	$3,03 \cdot 10^4$
2	воздух	81	1,3	$2,13 \cdot 10^{-5}$	$4,65 \cdot 10^4$
3	вода	12	998	0,001	$1,14 \cdot 10^5$
4	вода	6	729	$9,22 \cdot 10^{-5}$	$4,64 \cdot 10^5$

Анализ распределений скоростей, полученных в результате расчета, показал, что выходящий из каждой ячейки решетки поток теплоносителя приобретает тангенциальную составляющую скорости, отличающуюся направлением (по или против часовой стрелки) в соседних плоских рядах поля ячеек решетки. Для числа Рейнольдса $3,03 \cdot 10^4$ (средняя скорость воздуха 53 м/с) поперечные компоненты скорости приведены на рис. 5. Максимальные отклонения векторов скорости от оси канала на выходе из ячеек имеют место в областях, ориентированных под углами 0, 120 и 240° от оси y (рис. 5), где отношение поперечной скорости $V_{xy} = (V_x^2 + V_y^2)^{0,5}$ к продольной составляющей V_z имеет величину ~25%. Среднее по площади выходного сечения ячейки значение относитель-

ной поперечной скорости составляет 17,3%. Абсолютные поперечные скорости равны соответственно 12 и 10 м/с. Области с максимумами осевой скорости, где она равна ~65 м/с, ориентированы под углами 0, 120 и 240° от оси y , а среднее ее значение составляет 57,8 м/с.

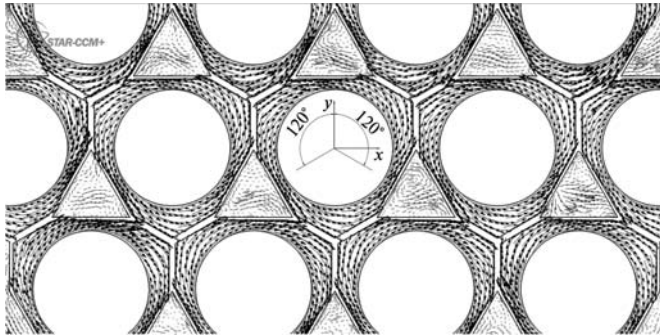


Рис. 5. Поле поперечных скоростей на выходе из решетки

Между соседними рядами ячеек поперечные компоненты скорости на выходе из решетки ориентированы одинаково. Таким образом, конфигурация решетки обеспечивает формирование направленного конвективного переноса вдоль слоев твэлов. Поперечные составляющие скорости на расстоянии 50 мм за решеткой (рис. 6) имеют величину 5...7 м/с, это эквивалентно ~10...13% от средней скорости потока.

Затухание поперечной скорости вдоль линии A при удалении от решетки иллюстрировано на рис. 7.

Среднее значение поперечной скорости вдоль линии A на расстоянии 250 мм от решет-

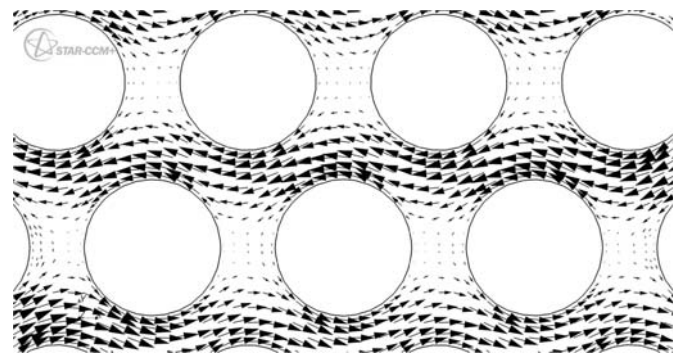


Рис. 6. Поле поперечных скоростей на удалении 50 мм от решетки

ки — 4,5 м/с, что составляет 8,5% от величины скорости основного течения.

Выполнен анализ течения в межъячеем пространстве решетки — криволинейных каналах, образованных за счет поворота выходного сечения ячейки относительно входного на угол 60°. Из результатов моделирования видно, что теплоноситель, попадающий в прямолинейный треугольный канал на входе в решетку (эти каналы аналогичны представленным на рис. 5), перераспределяется по сечению межъячеемого пространства на расстояния ~2/3 шага расположения стержней, как это схематично показано на рис. 8. При этом имеют место отрывы потоков с наружной поверхности ячеек решетки, а также вытеснение теплоносителя в зазор между периферией решетки и чехлом. Течение в межъячеемом пространстве вносит вклад в формирование поперечного переноса, так как потоки, выходящие из каналов между ячейками (см. также рис. 3 и 5), сонаправлены

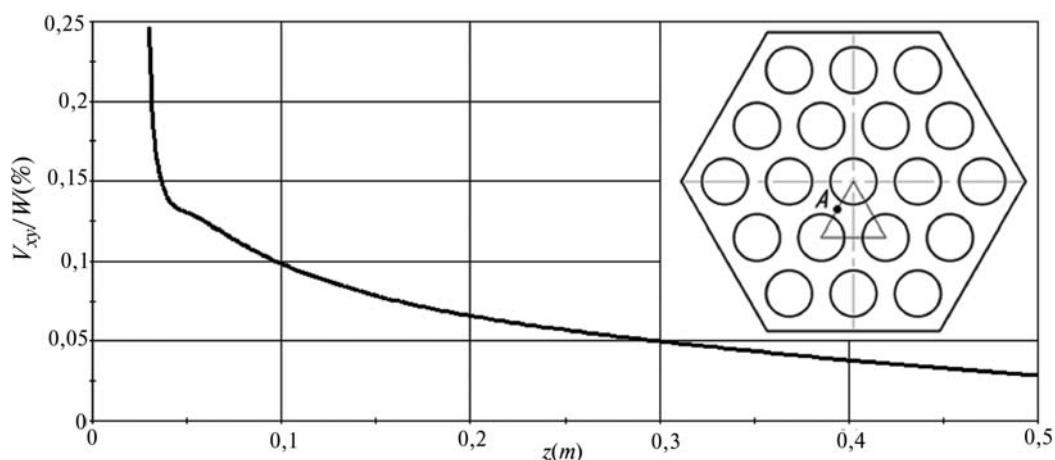


Рис. 7. Затухание поперечной скорости за решеткой (координата z отсчитывается от входа в решетку, $W = 53$ м/с — средняя продольная скорость потока)

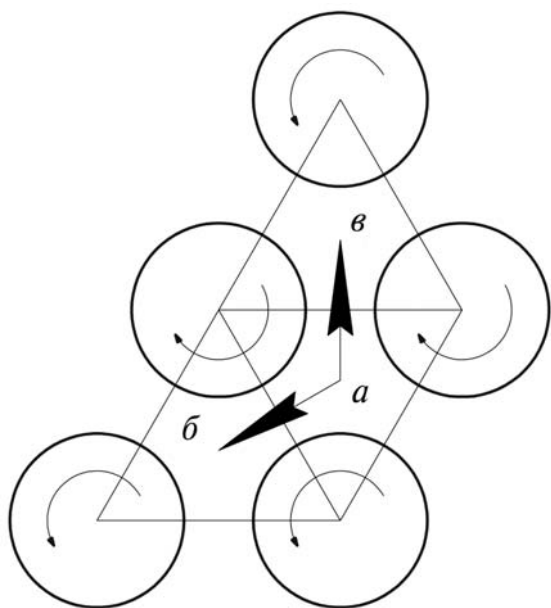


Рис. 8. Схема перераспределения потока в межъячейном пространстве: а — ячейка входа в решетку; б, в — ячейки выхода из решетки

с движением, индуцированным течениями в ячейках решетки. Интенсивность поперечной составляющей скорости на выходе из межъячейного пространства меньше, чем на выходе из ячеек, и составляет ~3,4% от осевой. Общий расход через межъячейное пространство составляет ~40% от суммарного расхода перед решеткой.

Помимо создания поперечной скорости, влияние сотовой решетки заключается также в деформации распределения осевой скорости потока. На рис. 9 приведены распределения осевой скорости вдоль оси x , отстоящей от

центрального слоя твэлов на расстоянии $y = -5,51$ мм (т. е. 0,96 мм от поверхности твэла. Перед решеткой ($z = -250$ мм) распределение скорости в поперечном сечении соответствует геометрии ячеек между стержнями, стержнями и чехлом.

Вблизи за решеткой ($z = 80$ мм) за счет поперечных потоков происходит выравнивание осевых скоростей в центральной области пучка, а в причехловой области возникают струи с более высокой скоростью под влиянием потоков, развивающихся в межъячейном пространстве (у исследуемой решетки отсутствовал шестигранный обод, герметизирующий снаружи межъячейное пространство). По мере затухания поперечной конвекции (см. рис. 7) профиль осевой скорости ($z = 280$ мм) приближается к таковому перед решеткой.

С использованием результатов численного моделирования определены значения КГС сотовой решетки (табл. 3). Эти результаты соответствуют максимальному размеру чехла «под ключ», равному 59 мм, когда доля байпасного расхода через межъячейное пространство была большой, что снижало долю расхода через ячейки. Отмеченный переток через межъячейное пространство уменьшает гидравлическое сопротивление решетки и значение КГС. При уменьшении размера чехла «под ключ» величина КГС при том же числе Рейнольдса потока в пучке увеличивается и приближается к экспериментальному значению $КГС = 1,09$ при $Re = (3...4,5) \cdot 10^4$.

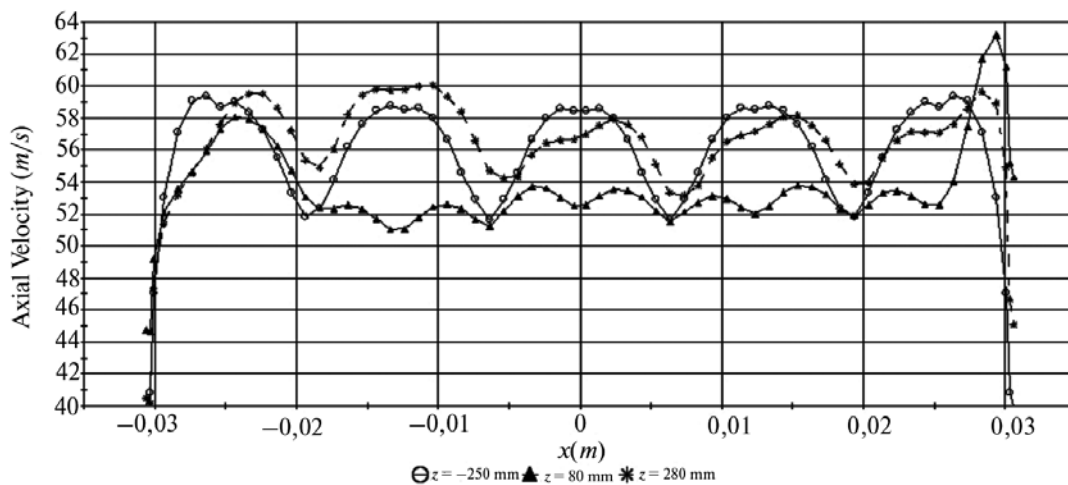


Рис. 9. Распределения осевой скорости перед и за сотовой решеткой

Таблица 3

Значения КГС сотой решетки при различных числах Рейнольдса

№	Тепло-носитель	Re	$\rho W^2/2$, Па	$\Delta P_{\text{реш}}$, Па	КГС
1	воздух	3,03·104	1625,8	1257,7	0,77
2	воздух	4,65·104	4230,3	2947,1	0,70
3	вода	1,14·105	718791	42343,6	0,59
4	вода	4,64·105	13121,0	6343,5	0,48

Примечание: Re — число Рейнольдса; $\rho W^2/2$ — скоростью напор; $\Delta P_{\text{реш}}$ — аппроксимированный перепад статического давления в среднем сечении решетки.

Расчетные значения КГС сотовой решетки в диапазоне чисел Рейнольдса $(0,3...4,6) \cdot 10^5$ аппроксимированы с погрешностью 5% соотношением

$$\frac{КГС_1}{КГС_2} \cong \left(\frac{Re_1}{Re_2} \right)^{-0,17} \quad (14)$$

Полученные результаты и их анализ позволяют сделать вывод об эффективности использования CFD-моделирования для выяснения закономерностей сложных взаимодействующих гидродинамических процессов, развивающихся при воздействии на течение сотовой решетки.

Литература

1. Солонин В.И. Решетки сотового типа для ВВЭР-1000 // Росэнергоатом. 2008. № 8. С. 17–20.
2. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
3. Baglietto E. CFD in nuclear industry, a whole new role, BMSTU, Moscow, 2010. 29 с.
4. Lien F., Chen W., Leschziner M. Low-Reynolds number eddy-viscosity modelling based on non-linear stress-strain / vorticity relations, Proc. 3-rd Symp. On Engineering Turbulence Modelling and Measurements, Greece, 1996. 21 с.
5. User Guide. Star-CCM+Version 4.04.11. CD-adapco, 2009. 5048 с.
6. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2001. 108 с.

Статья поступила в редакцию 29.01.2011 г.

В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА
 вышел в свет учебник
 под общей редакцией К.С. Колесникова и В.В. Дубинина
 «Курс теоретической механики»

В учебнике изложены вопросы кинематики, статики, динамики точки, твердого тела и механической системы; аналитической механики, теорий колебаний и удара. Дано введение в динамику тел переменной массы, а также основы небесной механики. Приведены примеры решения задач.

Учебник предназначен для студентов машиностроительных вузов и технических университетов, может быть полезен специалистам в области статики и динамики механических систем.

По вопросам приобретения обращаться:
 Тел.: (499) 263-60-45, тел./факс: 261-45-97