

УДК 621.039.517

П. В. Марков, В. И. Солонин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В ПУЧКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТВЭЛОВ РЕАКТОРА ВВЭР, ДИСТАНЦИОНИРОВАННЫХ СОТОВОЙ РЕШЕТКОЙ

Рассмотрены вопросы физического и численного моделирования течения в пучке твэлов с сотовой дистанционирующей решеткой, создающей направленный конвективный перенос. Исследовано влияние сжимаемости потока в аэродинамическом эксперименте на гидравлические характеристики. Приведено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными.

E-mail: marrkov@list.ru; en7@power.bmstu.ru

Ключевые слова: сотовая решетка, водо-водяные реакторы под давлением, вычислительная гидродинамика, аэродинамический эксперимент, коэффициент гидравлического сопротивления.

Охлаждающий активную зону ВВЭР поток водного теплоносителя имеет среднемассовую энтальпию, заметно меньшую энтальпии насыщения при минимальном давлении в активной зоне. Однако в отдельных ее областях из-за неоднородности теплогидравлических трактов охлаждения тепловыделяющих элементов (ТВЭлов) и неравномерного энерговыделения в них поток приобретает локальную энтальпию, близкую или превышающую энтальпию насыщения. Следствием чего является возможность возникновения кризиса теплоотдачи, если локальный тепловой поток в области с высокой энтальпией превышает критический, что угрожает дополнительными повреждениями оболочек ТВЭлов — важного барьера безопасности.

Для безопасного повышения мощности ТВЭлов достаточно снизить локальную энтальпию теплоносителя по отношению к энтальпии насыщения, увеличив для этого интенсивность тепло- и массообмена в потоке, движущемся в пучке неоднородно нагретых ТВЭлов. Тем самым обеспечивается повышение критического теплового потока — фактора, ограничивающего тепловую мощность ТВЭлов.

Для интенсификации тепло- и массообмена предложено несколько конструктивных решений перемешивающих решеток [1, 2]. В настоящей работе рассмотрены дистанционирующие решетки с оригинальной конструкцией ячеек (сот), разработанные ОАО “МСЗ” [3], которые создают направленный конвективный перенос в поперечном сечении пучка ТВЭлов.

Решетки выполнены из двух типов ячеек, отличающихся между собой только направлением наклона пуклевок-каналов, создающих на внутренней и внешней поверхностях ячейки наклонные каналы (рис. 1). Каждый тип ячеек располагается в последовательных плоских рядах, которые чередуются по сечению решетки. Ячейки в периферийном ряду отличаются от других ячеек (ячеек центрального поля) тем, что их форма позволяет осуществить крепление решетки к правильному шестигранному ободу с помощью контактной точечной сварки. Теплоноситель в исследуемой решетке движется частично вдоль по-

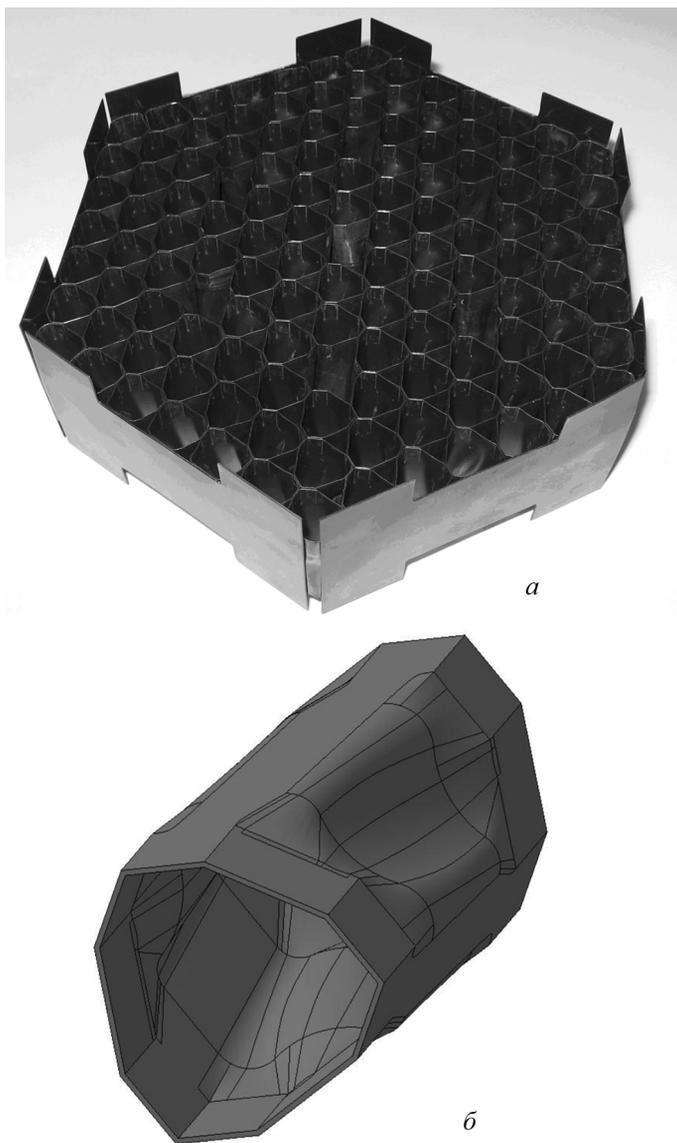


Рис. 1. Дистанционирующая решетка, использованная в экспериментах (а), и твердотельная модель ячейки центрального поля (б)

верхности твэлов внутри ячеек решетки, частично — в зазорах между ячейками. Потоки в ячейках взаимодействуют с наклонными пучками и приобретают тангенциальные составляющие скорости. Потоки в зазорах между ячейками движутся в сообщающихся каналах переменной формы, образующихся за счет поворота выходного сечения ячейки относительно входного на угол 60° . Вытекание потоков из зазоров на периферии решетки ограничено ободом (см. рис. 1).

Рассмотрим задачу моделирования гидродинамики и тепломассообмена в потоке, формируемом пучком продольно обтекаемых гладких стержневых твэлов, размещенных в регулярной треугольной упаковке, образованной дистанционирующей решеткой.

Для физической модели использованы оболочки твэлов натурной геометрии с качеством поверхности, соответствующим таковой в состоянии поставки тепловыделяющих сборок (ТВС) ВВЭР потребителю. Сотовая дистанционирующая решетка и другие элементы физической модели изготовлены ОАО «МСЗ» с использованием технологий опытного производства. Тем самым обеспечено геометрическое подобие трактов теплоносителя в контуре и модели. Продольный размер пучка твэльных трубок выбран равным $\sim 1,2$ м, достаточным для формирования стабилизированного течения перед и за решеткой (относительная длина каналов для потока составляет 60 гидравлических диаметров).

В модели использовался 127-стержневой пучок, включающий в себя 126 оболочек твэлов диаметром 9,1 мм, установленных в правильной треугольной упаковке с шагом 12,72 мм, и центральную трубку диаметром 13,2 мм, моделирующую направляющий канал для органа регулирования реактивности. Пучок модели с дистанционирующей решеткой размещен в шестигранном чехле с размером «под ключ» 147 мм.

Число Рейнольдса течения воды в пучке твэлов ТВС ВВЭР составляет $\sim 5 \cdot 10^5$. При моделировании использован поток воздуха, физические свойства которого при значении средней в пучке скорости около 60 м/с обеспечили значения числа Рейнольдса $\sim 4 \cdot 10^4$. Таким образом, в физическом эксперименте реализованы меньшие числа Рейнольдса, чем в условиях реактора. Число Маха потока в модели достигало $M_3 \sim 0,2$, в то время как в натуральных условиях $M_n \sim 6 \cdot 10^{-3}$. Большие скорости потока в модели приводят к большим значениям чисел Фруда, которые, однако, малосущественны как в натурном, так и в модельном течениях.

Оценка влияния числа Маха на характеристики течения в модели выполнена с использованием усредненного уравнения турбулентного движения вязкого сжимаемого газа в приближении Буссинеска [4], которое после строгих преобразований было приведено к виду:

$$\sum_j \tilde{V}_j \frac{\partial \tilde{V}_i}{\partial \tilde{x}_j} = -Eu \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{x}_i} + \frac{1}{\text{Re}} \left(1 + \frac{\nu_T}{\nu}\right) \left[\sum_j \frac{\partial^2 \tilde{V}_i}{\partial \tilde{x}_j^2} - Eu M^2 \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial \tilde{x}_i} \sum_j \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{x}_j} \right], \quad (1)$$

где символ “~” означает безразмерные переменные; Eu — число Эйлера; $M = V_z \sqrt{\frac{\rho}{E}}$ [5], E — модуль объемной упругости; V_z — средне-расходная скорость потока воздуха.

Из выражения (1) следует, что число Маха влияет на потерю количества движения в потоке. Мерой влияния числа Маха на турбулентное течение может быть принят параметр $Eu \cdot M^2$.

Математическая модель течения базируется на системе уравнений гидродинамики сжимаемой вязкой турбулентной среды:

$$\rho \sum_j V_j \frac{\partial V_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \sum_j \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

— баланса количества движения;

$$\sum_j \frac{\partial \rho V_j}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

— баланса массы;

$$\tau_{ij} = 2\mu S_{ij} - \frac{2}{3} \sum_k \frac{\partial V_k}{\partial x_k} \delta_{ij} + T_{ij}, \quad (4)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

— выражений для компонент тензора напряжений и тензора деформаций, где δ_{ij} — оператор Кронекера.

Поскольку течение в каналах, образованных ячейками дистанционирующей перемешивающей решетки, происходит по криволинейным траекториям, то имеет место анизотропия и закрутка потока, поэтому использование традиционных моделей турбулентности — стандартной линейной k - ε -модели или SST k - ω — некорректно. Согласно рекомендациям, изложенным в работе [6], такие особенности течения могут быть учтены использованием нелинейных k - ε -моделей, например квадратичной [7], в которой компоненты тензора турбулентных напряжений задаются следующим образом:

$$T_{ij} = 2\mu_T S_{ij} - \frac{2}{3} \left[\mu_T \sum_k \frac{\partial V_k}{\partial x_k} + \rho k \right] \delta_{ij} -$$

$$\begin{aligned}
& - 4C_1\mu_T \frac{k}{\varepsilon} \left[\sum_k S_{ik}S_{kj} - \frac{1}{3} \sum_k \sum_l S_{kl}S_{lk}\delta_{ij} \right] - \\
& - 4C_2\mu_T \frac{k}{\varepsilon} \left[\sum_k \omega_{ik}S_{kj} + \sum_k \omega_{jk}S_{ki} \right] - \\
& - 4C_3\mu_T \frac{k}{\varepsilon} \left[\sum_k \omega_{ik}\omega_{kj} - \frac{1}{3} \sum_k \sum_l \omega_{kl}\omega_{kl}\delta_{ij} \right], \quad (6)
\end{aligned}$$

где

$$\omega_{ij} = \frac{\partial V_i}{\partial x_j} - \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \quad (7)$$

— компоненты тензора завихренности.

Кинетическая энергия турбулентности определяется из уравнения

$$\rho \sum_j V_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_T P - \rho \varepsilon, \quad (8)$$

где

$$P = \frac{1}{\mu_T} \sum_i \sum_j T_{ij} \frac{\partial V_i}{\partial x_j}. \quad (9)$$

Уравнение для скорости диссипации кинетической энергии имеет вид

$$\begin{aligned}
\rho \sum_j V_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\
+ \frac{\varepsilon}{k} \left(C_{\varepsilon 1} \mu_T P - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 4} \rho k \sum_j \frac{\partial V_j}{\partial x_j} \right). \quad (10)
\end{aligned}$$

Турбулентная вязкость определяется по формуле

$$\mu_T = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon}. \quad (11)$$

Коэффициенты квадратичной модели записываются как

$$C_1 = \frac{C_{nl1}}{(C_{nl6} + C_{nl7}S^{*3})C_\mu}, \quad C_2 = \frac{C_{nl2}}{(C_{nl6} + C_{nl7}S^{*3})C_\mu}; \quad (12)$$

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

$$C_\mu = \frac{C_{a0}}{C_{a1} + C_{a2}S^* + C_{a3}\omega^*}; \quad (13)$$

$$S^* = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{2 \sum_i \sum_j S_{ij}S_{ij}}, \quad \omega^* = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{2 \sum_i \sum_j \omega_{ij}\omega_{ij}}. \quad (14)$$

Значения постоянных выражений (8), (10), (12) и (13) приведены в таблице.

Постоянные квадратичной k - ε -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
$C_{\varepsilon 4}$	-0,33	C_{nl3}	4,75	C_{a2}	1,0
σ_k	1,0	C_{nl6}	1000	C_{a3}	0,9
σ_ε	1,3	C_{nl7}	1,0	—	—

Уравнение состояния в случае течения газа постоянной плотности имеет вид

$$\rho = \rho_0, \quad (15)$$

в случае течения идеального газа —

$$\rho = \frac{PM}{RT}, \quad (16)$$

где M — молекулярный вес; R — универсальная газовая постоянная; T — абсолютная температура.

Для реализации математической модели был использован программный комплекс STAR-CCM+ [8], отличительной особенностью которого является возможность автоматического построения многогранных сеток, что важно из-за сложной геометрии ячеек перемешивающей решетки.

CFD-модель 127-стержневого пучка с дистанционирующей перемешивающей решеткой состоит из трех частей: входного участка стержневой сборки длиной 500 мм, участка с перемешивающей решеткой длиной 30 мм, выходного участка, имеющего длину 433 мм.

Входные и выходные участки, симметричные относительно средней плоскости решетки, образованы вследствие зеркального отражения объемной сетки, полученного посредством экструзии, из выходного сечения области, представляющей собой 1/4 часть канала. При приближении к решетке сетки сгущаются 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 составляет 1,0 мм. На поверхностях стержней и чехла образован призматический слой толщиной 0,5...0,65 мм. Толщина призматического слоя выбрана из соображений удовлетворения условию корректной работы “пристеночных функций” [4] $150 > y^+ > 30$, где y^+ — безразмерная координата центров ячеек в призматическом слое. Длину входного участка выбирали

из условия стабилизации потока перед решеткой, длину выходного – из соответствия граничного условия “давление на выходе” экспериментальным данным при моделировании течения сжимаемого потока воздуха для верификации расчета. На входе в пучок задавалось постоянство массовой скорости, поверхности решетки, стержней и чехла принимались идеально гладкими и неподвижными адиабатическими стенками.

Для создания сеточной модели области решетки сгенерированы отдельно расчетные сетки внутриячейных областей и одна сетка для межъячейной области, после чего проведено их сопряжение. Процесс создания сеточных моделей внутриячейных областей включает в себя 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 составляет 0,5 мм. Прямолинейные входные и выходные участки длиной 4 мм получены равномерной экструзией из сетки на торцах ячейки, число слоев на каждом участке равно 8.

Для создания сеточной модели межъячейного пространства, представляющего собой набор криволинейных каналов, использован инструмент ПК STAR-CCM+ “замыкание поверхности”. Этот инструмент позволяет получить расчетную область, т.е. область, занимаемую жидкостью, из исходной твердотельной модели узла, что целесообразно, когда ее ручное создание в графическом пакете становится неэффективным. Характерный размер ячеек поверхностной сетки – 0,5 мм. Входной и выходной участки получены экструзией.

На финальной стадии построения расчетной сетки было выполнено объединение сеточных моделей различных участков посредством внутренних интерфейсов. Подготовленная сеточная модель 127-стержневого пучка (рис. 2) для проведения CFD-расчета, состояла из ~12 млн контрольных объемов.

В расчете моделировалось течение сжимаемого и несжимаемого потоков воздуха с параметрами, типичными для условий эксперимента (массовая скорость – $70,74 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, число Рейнольдса – $3,72 \cdot 10^4$).

Перепады давления на макете приводили к относительному изменению плотности ~8 %.

Анализ полей 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 (рис. 3).

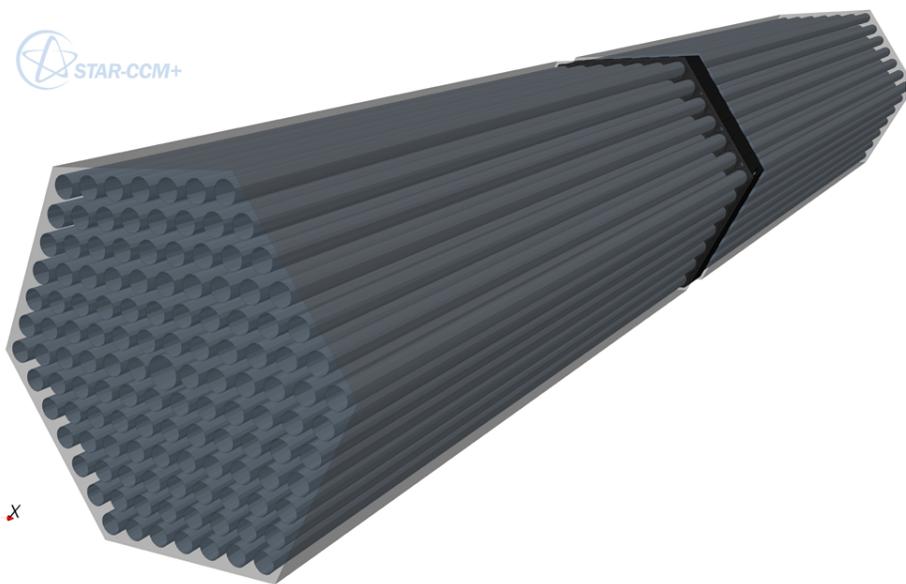


Рис. 2. Расчетная область

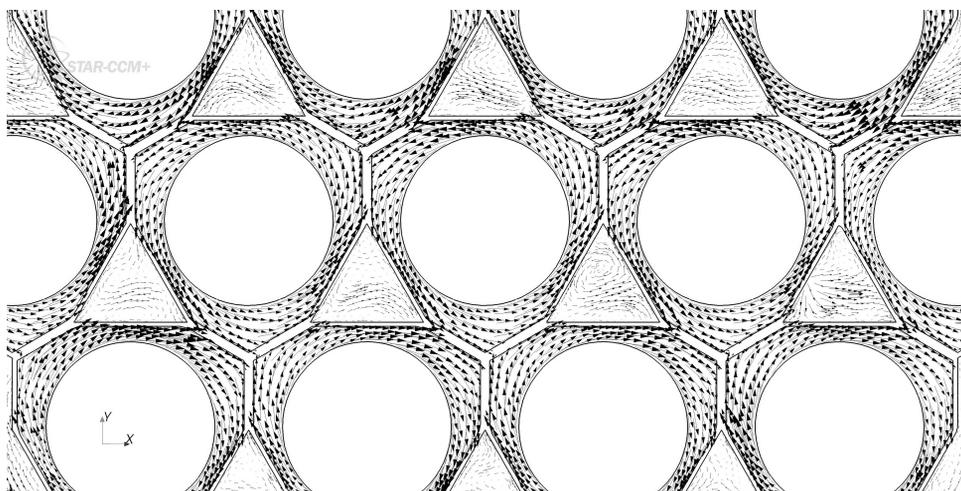


Рис. 3. Поля касательных скоростей на выходе из решетки

Для оценки интенсивности закрутки потока в ячейках решетки рассматривалось среднее по площади выходного сечения ячеек значение отношения касательной составляющей скорости $V_{xy} = (V_x^2 + V_y^2)^{0,5}$ к нормальной V_z , которое для ячеек центрального поля имеет значение $\sim 17\%$, для периферийных и угловых — $\sim 18\%$. При этом среднее значение осевой скорости на выходе из центральных ячеек составляет 75 м/с, а из периферийных и угловых — 68,5 м/с. Доля от общего расхода, проходящая внутри ячеек, составляет $\sim 70\%$.

Между соседними плоскими рядами касательные составляющие скорости ориентированы одинаково (“вправо” или “влево” между по-

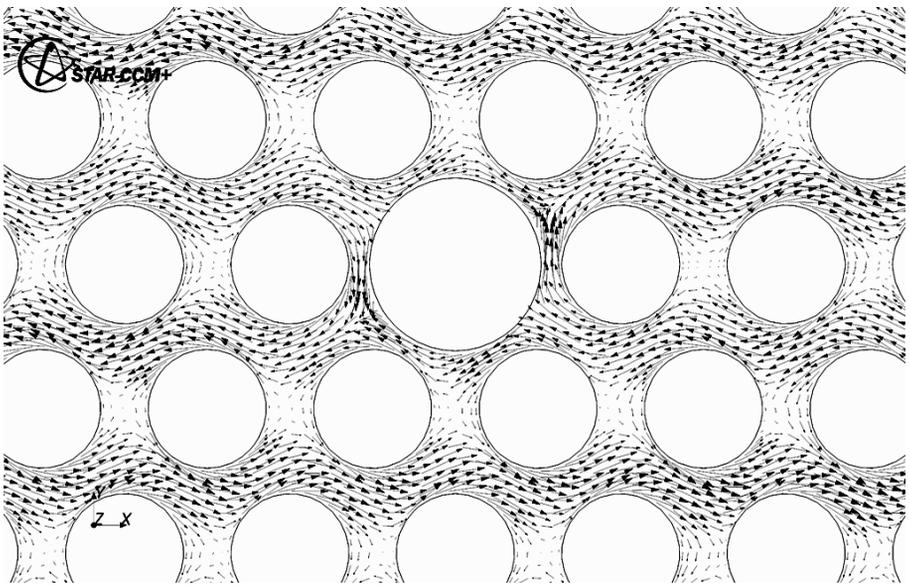


Рис. 4. Поле касательных скоростей за решеткой

следовательными рядами, если они расположены горизонтально). Таким образом, конфигурация ячеек и их размещение в поле решетки обеспечивают направленный конвективный перенос вдоль слоев тв-элементов (рис. 4). Касательная составляющая скорости на расстоянии 50 мм за решеткой имеет значение 5...7 м/с, это эквивалентно ~10% средней скорости потока. Причем интенсивность поперечного переноса увеличивается по направлению вторичного течения. В области периферийных ячеек поток разделяется на две части, имеющие приблизительно равные расходы (разность между линейными расходами, определяемыми как $G_{xy} = V_{xy}^{mid} \cdot s$, где V_{xy}^{mid} — среднее по длине зазора значение поперечной скорости, s — ширина зазора между чехлом и периферийными стержнями, не превышает 5...10%).

Как известно, наиболее энергонапряженными областями в ТВС ядерных реакторов являются тракты теплоносителя близ направляющих каналов, центральной трубы и уголков жесткости, где имеет место загромождение проходного сечения и, следовательно, уменьшение локальных скоростей, что приводит к увеличению подогрева теплоносителя, которое может привести к его подкипанию и возникновению кризиса теплоотдачи.

При приближении к центральной трубе вторичное течение замедляется, при этом за счет равноценности гидравлических трактов поток обтекает центральную трубу не только в поперечном (x), но и в перпендикулярном ему (y) направлениях (см. рис. 4).

Для оценки затухания поперечной конвекции в указанных областях на рис. 5 приведены распределения касательных скоростей вдоль линий 1, 2, 3 (см. рис. 5) при удалении от решетки.

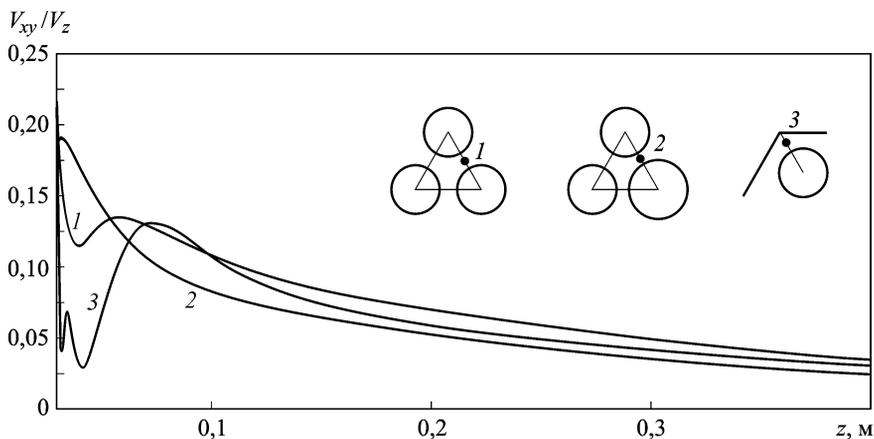


Рис. 5. Распределения относительных касательных скоростей при удалении от решетки:

$V_z = 59 \text{ м/с}$ — среднерасходная скорость

Как следует из рис. 5, затухание поперечной скорости близ центральной трубы и углового стержня происходит более интенсивно, чем в поле центральных стержней. Среднее значение поперечной скорости на расстоянии $\sim 250 \text{ мм}$ за решеткой вдоль линии 1 составляет $5,2 \text{ м/с}$ ($\sim 9\%$ средней скорости), вдоль линий 2, 3 — $4,3 \text{ м/с}$ ($\sim 7\%$).

Помимо рассмотренного механизма образования поперечных течений в пучке твэлов за решеткой и последующего перемешивания теплоносителя, имеет место и перемешивание в межъячейстом пространстве решетки, обусловленное наличием криволинейных каналов, образованных за счет поворота выходного сечения ячейки относительно входного на угол 60° .

В результате моделирования выявили, что теплоноситель, попадающий в прямолинейный треугольный канал между основаниями соседних ячеек (расход теплоносителя $\sim 30\%$ общего расхода), не имея сквозного прохода, вынужден перераспределяться в близлежащие области, за счет чего происходит конвективный перенос на расстоянии $\sim 2/3$ шага расположения стержней. Такое течение интенсифицирует поперечный перенос, так как струи, выходящие из каналов между ячейками, сонаправлены с движением, индуцированным ячейками решетки (см. рис. 3), однако интенсивность касательной составляющей скорости на выходе из межъячейстого пространства невелика и составляет $\sim 3\%$ осевой.

Расчетное распределение осевых скоростей (рис. 6) между вторым и третьим горизонтальными рядами стержней вдоль оси x_1 , отстоящей от горизонтальной плоскости симметрии пучка на расстоянии $16,22 \text{ мм}$ (направление движения зонда противоположно направлению оси x , показанной на рис. 6), удовлетворительно согласуется с экспериментом.

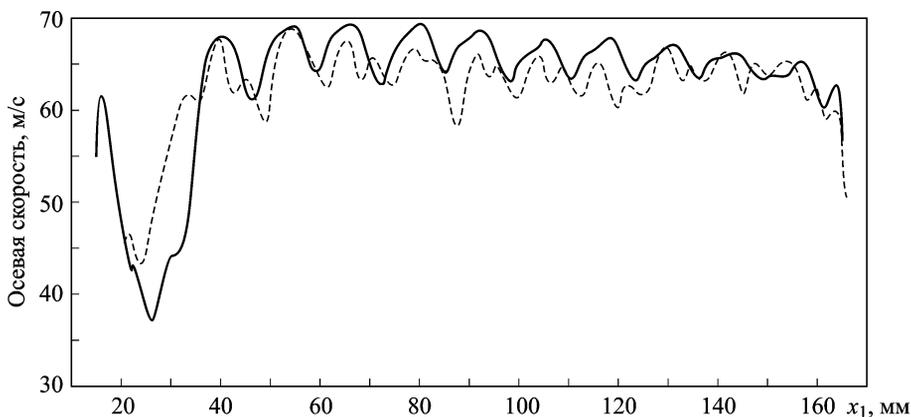


Рис. 6. Расчетное и экспериментальное распределения осевой скорости вдоль оси x_1 :

сплошная линия — расчет; штриховая — эксперимент

“Провал” профилей скорости при $x_1 = 15 \dots 35$ мм обусловлен конструкцией решетки: в пространстве между периферийными ячейками имеются изолированные криволинейные каналы с повышенным гидравлическим сопротивлением, на выходе из которых формируются струи с меньшими, чем в остальной области, скоростями. Уменьшение осевой скорости по направлению движения зонда, соответствующего направлению вторичного течения, связано с интенсификацией поперечного переноса, т.е. с отклонением векторов скорости от оси.

Сравнение результатов численного моделирования и экспериментов выполнено по значениям коэффициентов гидравлического сопротивления (КГС), определяемым как

$$\text{КГС} = \frac{2\Delta P_{\text{реш}}}{\rho V_z^2}, \quad (17)$$

где $\Delta P_{\text{реш}}$ — перепад статического давления в среднем сечении решетки; ρ , V_z — плотность воздуха и среднерасходная скорость воздуха перед решеткой.

Расчетный КГС для числа Рейнольдса $3,7 \cdot 10^4$ при течении газа постоянной плотности равен 1,38. Для сжимаемого потока значение КГС, определенное по перепаду полного давления, составило 1,52. Экспериментальное значение КГС, рассчитанное по перепаду полного давления, равно $1,41 \pm 0,04$.

По итогам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Конструкция сотовой решетки, предложенной ОАО “МСЗ”, обеспечивает направленный конвективный перенос в пучке твэлов, что позволит интенсифицировать перемешивания в ТВС, уменьшить температурные неоднородности и тем самым увеличить критический тепловой поток. Установка направляющих каналов снижает интенсивность

перемешивания вследствие уменьшения средней поперечной скорости на $\sim 25\%$ по сравнению с таковой в регулярной решетке твэлов.

2. Для экстраполяции полученных значений КГС дистанционирующей решетки на натурные параметры потоков в ТВС можно воспользоваться зависимостью, полученной из результатов вариантных расчетов КГС 19-ячеистого фрагмента сотовой дистанционирующей решетки аналогичной конструкции, выполненных для диапазона чисел Рейнольдса $Re = (0,3-5) \cdot 10^5$ [9]:

$$\frac{КГС_1}{КГС_2} \approx \left(\frac{Re_1}{Re_2} \right)^{-n}, \quad (18)$$

где $n = 0,17$.

Аналогичный результат (уменьшение КГС с ростом числа Рейнольдса) был получен в ФЭИ [10] при исследовании гидравлических характеристик различных решеток на гидродинамическом стенде в диапазоне чисел Рейнольдса $(0,3-3) \cdot 10^4$. Таким образом, можно ожидать, что значение КГС решетки в условиях, близких к реакторным ($Re = 5 \cdot 10^5$), будет равно $\sim 0,9$.

3. Получение гидравлических характеристик решеток на аэродинамических стендах приводит к заметному повышению КГС из-за влияния меньшего числа Рейнольдса, а при стремлении реализовать равенство числа Рейнольдса аэродинамического эксперимента и натурального течения теплоносителя за счет увеличения скорости воздуха — вследствие влияния сжимаемости. Роль сжимаемости, согласно результатам расчетов, в первом приближении можно оценить по выражению

$$КГС_{сж} = КГС_n(1 + M^2 Eu), \quad (19)$$

где $КГС_{сж}$ — коэффициент гидравлического сопротивления при течении сжимаемого газа; $КГС_n$ — коэффициент гидравлического сопротивления при течении жидкости постоянной плотности, $Eu = 2КГС_{сж}$.

4. Использование в CFD-анализе модели несжимаемой жидкости — эффективный инструмент исследования гидродинамических процессов, происходящих в сложных конструктивных узлах водо-водяных ядерных реакторов и прогнозирования их характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Расчетное исследование циркуляции теплоносителя в ТВС с решетками перемешивающего типа / А.С. Корсун, В.Б. Круглов, Ю.А. Маслов и др. // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – № 23.
2. Исследование эффективности перемешивающих решеток в обоснование выбора оптимальной конструкции ТВСА-АЛЬФА реактора типа ВВЭР / С.С. Бородин, С.М. Дмитриев и др. // Ядерная энергетика и техническая физика. – 2010.
3. Соловьев В. И. Решетки сотового типа для ВВЭР-1000 // Журнал “Росэнергоатом”. – 2008. – № 8.

4. Белов И. А., Исаев С. А. Моделирование турбулентных течений. – СПб.: Изд-во Балт. гос. техн. ун-та, 2001.
5. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974.
6. Baglietto E. CFD in nuclear industry, a whole new role, BMSTU, Moscow, 2010.
7. 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.
8. User Guide. Star-CCM+ Version 4.04.11 // CD-adapco, 2009.
9. Солонин В. И., Марков П.В. Гидродинамика сотовой решетки – интенсификатора // Изв. вузов. Машиностроение. – 2011. – № 3.
10. Разработка конструкции сотовой дистанционирующей перемешивающей решетки / А.В. Иванов, Н.В. Одинцов, Н.И. Перепелица и др. // Семинар-совещ. по вопросам интенсификации теплообмена в ТВС ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200, Обнинск, 2009.

Статья поступила в редакцию 1.04.2011

Павел Владимирович Марков родился в 1984 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2008 г. Ассистент, аспирант кафедры “Ядерные реакторы и установки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор семи научных работ в области ядерной технологии и вычислительной гидродинамики.

P.V. Markov (b. 1984) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2008. Assistant lecturer, post-graduate of “Nuclear Reactors and Plants” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 7 publications in the field of nuclear technology and computational hydrodynamics.



Владимир Иванович Солонин родился в 1938 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1960 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Ядерные реакторы и установки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области ядерных технологий.

V.I. Solonin (b. 1938) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1960. D. Sc. (Eng.), professor of “Nuclear Reactors and Plants” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications in the field of nuclear technologies.

