

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В ТВС ВОДООХЛАЖДАЕМЫХ РЕАКТОРОВ СОТОВЫМИ ПЕРЕМЕШИВАЮЩИМИ РЕШЕТКАМИ

П.В. Марков

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
г. Москва*



Созданы CFD-модели семи- и 19-стержневых пучков с различными сотовыми перемешивающими решетками, индуцирующими направленный конвективный перенос. Исследовано течение теплоносителя, формируемое каналами решеток. Проведены расчеты гидравлических и перемешивающих характеристик сотовых решеток.

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

Key words: cellular mixing grid, computational fluid dynamics, turbulence model, pressure loss coefficient, pressure water reactors.

Актуальность работ по созданию интенсифицирующих решеток для тепловыделяющих сборок (ТВС) отечественных атомных реакторов типа ВВЭР обусловлена необходимостью повышения мощности существующих блоков и создания новых блоков повышенной безопасности. Интенсифицирующие решетки должны снижать неравномерности теплотехнических характеристик потока теплоносителя в сечениях ТВС, вызванные как геометрией трактов, представляющих собой совокупность взаимосвязанных каналов сложной геометрии, так и закономерностями формирования полей энерговыделений в результате цепной ядерной реакции деления. Эти неравномерности приводят к появлению «горячих струй» в наиболее энергонапряженных трактах ТВС, что снижает запасы до возникновения кризиса теплоотдачи первого рода, приводит к локальным увеличениям температуры оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОВ), их последующей разгерметизации, выходу радиоактивных продуктов деления в контур циркуляции.

Для надежной работы ТВС повышенной мощности, увеличения глубины выгорания топлива усовершенствуются конструкции входящих в ТВС компонентов и узлов, в том числе в конструкцию ТВС включаются турбулизирующие и перемешивающие решетки. Подобные разработки выполнялись для реакторов PWR с 1970 гг. прошлого века, РБМК-1500 (1980-е гг.), развиты для реакторов ВВЭР в связи с принятыми программами развития ядерной энергетики России в XXI в.

Для интенсификации перемешивания теплоносителя в ТВС водо-водяных реакторов нового поколения различными организациями предложены конструкции пластинчатых [1] и сотовых перемешивающих решеток [2]. В работе анализируются интенсифицирующие межъячейстый обмен в ТВС ВВЭР модернизированные сотовые решетки, предложенные к использованию ОАО «МСЗ» г. Электросталь [3].

Интенсифицирующий эффект от рассматриваемых решеток заключается в турбулизации потока за ними и в создании компонент скорости в направлении, перпендикулярном основному течению теплоносителя (направленного конвективного переноса). Такое воздействие обеспечивается наличием наклонных к оси пучка гофр (пуклевок) на ячейках решетки, причем ячейки, расположенные в соседних слоях, имеют противоположные углы наклона осей пуклевок (рис. 1а). Однако деформация потока в каналах, образованных ячейками решетки и поверхностями твэлов, приводит к большим потерям энергии по сравнению с потерями энергии в штатных дистанционирующих решетках ВВЭР [3]. В связи с этим задачей исследования являлось определение предпочтительных характеристик возможных конструкций сотовых решеток, обладающих приемлемым гидравлическим сопротивлением и необходимыми перемешивающими свойствами.

Исследования проводились для 11-ти вариантов решеток, часть которых была выполнена как перемешивающие (СПР) с диаметром вписанного в ячейку цилиндра $d_{вн}$, большим, чем диаметр твэла $d_{ТВ}$ ($d_{вн} - d_{ТВ} = 0.1$ мм). Другая часть выполнена в предположении, что решетка может выполнять и функцию дистанционирования твэлов (стержни устанавливаются в решетку с натягом: $d_{вн} = d_{ТВ}$). Такие решетки именуется как сотовые дистанционирующие перемешивающие решетки (СДПР). В целях анализа влияния порядкового чередования ячеек на создание направленного поперечного переноса в пучках стержней за решетками были рассмотрены модели решеток, ячейки которых имели одинаковую ориентацию пуклевок по всему полю решетки (рис. 1б).

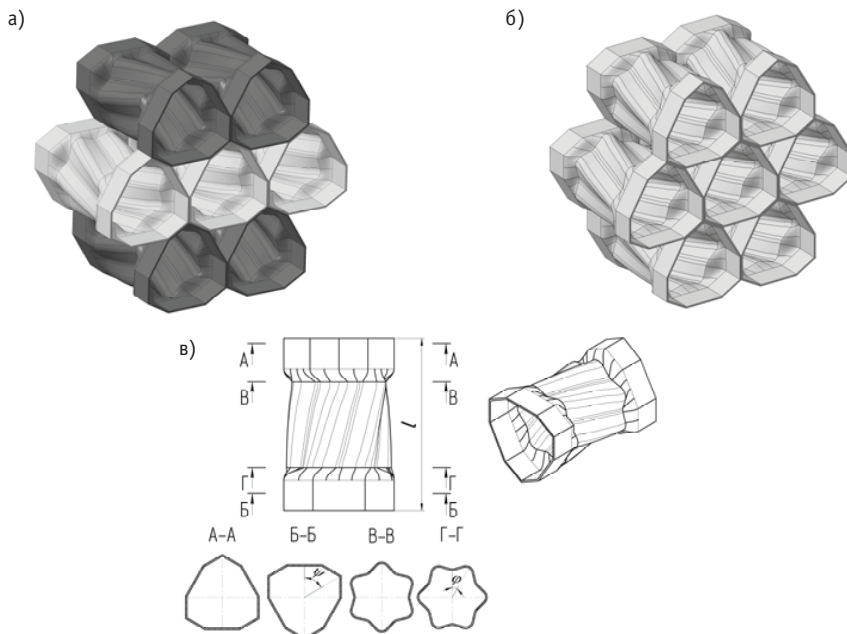


Рис. 1. Конструкция перемешивающей решетки: а) – внешний вид варианта 7-ми ячейкового фрагмента сотовой перемешивающей решетки с порядковым чередованием ячеек; б) – внешний вид варианта 7-ячейкового фрагмента сотовой перемешивающей решетки без порядкового чередования ячеек; в) – вариант исполнения ячейки и параметры, подлежащие изменению

Для оптимизации конструкции решетки изменению подлежали следующие параметры ячеек (сот) (рис. 1в):

- длина l , определяющая жесткость решетки, упругие свойства пуклевок и гидравлическое сопротивление решетки;
- количество пуклевок n , которое влияет на загромождение сечения, деформацию потока в каналах, образованных стержнями и поверхностью ячеек, гидравлическое сопротивление;
- угол наклона пуклевок φ , от которого зависит тангенциальная скорость потока на выходе из ячеек, интенсивность перемешивания, гидравлическое сопротивление;
- угол поворота выходного сечения относительно входного ψ , влияющий на геометрию каналов для теплоносителя, в том числе не омывающего в области решетки поверхность твэлов. Этот угол влияет на отношение расходов теплоносителя внутри ячеек решетки и в межъячеечном пространстве и тем самым на закрутку потока на выходе из ячеек, гидравлическое сопротивление решетки.

Геометрия пучка твэлов, технологические возможности производства, требования, предъявляемые к жесткости решетки, влияющей на работоспособность ТВС, накладывают ограничения на перечисленные параметры (табл. 1). Диапазон параметров определен в процессе разработки конструкции решеток ОАО «МСЗ», выполнявшейся с привлечением данных исследований кафедры «Ядерные реакторы и установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Таблица 1

Ограничения, наложенные на геометрию ячеек решеток

Параметр	l , мм	n	φ , град	ψ , град
Диапазон	20 – 30	3, 6	10 – 30	0, 60

Геометрические характеристики решеток приведены в табл. 2. Последний вариант решетки таблицы соответствует штатной дистанционирующей решетке (СДР).

Математическая модель, используемая в данной работе для исследования гидродинамики потока и переноса тепла в пучках стержней с сотовыми перемешивающими решетками, предложенными ОАО «МСЗ», базируется на системе осредненных уравнений движения вязкой несжимаемой турбулентной среды:

- баланс массы

$$\sum_j \frac{\partial V_j}{\partial x_j} = 0, \quad (1)$$

где V_i – проекция вектора скорости в направлении x_i ;

- баланс количества движения

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

где ρ – плотность, P – статическое давление, компоненты тензора напряжений τ_{ij} и скоростей деформаций S_{ij} определяются как

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

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

Наименование и параметры сотовых решеток

Решетка	Порядовое чередование ячеек	Длина ячеек, мм	Число ячеек	Угол наклона пуклевок, град	Угол поворота выходного сечения относительно входного, град
СПР 1	Есть	20	6	30	60
СПР 2	Нет	20	6	30	60
СПР 3	Есть	20	6	30	0
СПР 4	Есть	20	6	20	60
СПР 5	Есть	20	6	10	60
СПР 6	Есть	20	3	30	60
СПР 7	Есть	20	3	20	60
СПР 8	Есть	30	3	30	60
СПР 9	Есть	30	3	20	60
СДПР 1	Есть	30	3	20	60
СДПР 2	Нет	30	3	20	60
СДР	Нет	20	3	0	0

Для замыкания системы уравнений движения использована квадратичная $k-\varepsilon$ -модель, позволяющая учитывать такие особенности течения в пучках стержней с перемешивающими решетками, как анизотропия турбулентности, закрутка потока, искривление линий тока [4]. Компоненты тензора турбулентных напряжений в этой модели задаются с учетом тензора анизотропии [5]:

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

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

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

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

Уравнение для скорости диссипации кинетической энергии

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

Турбулентная вязкость

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

Коэффициенты квадратичной модели:

$$C_1 = \frac{C_{nl1}}{(C_{nl6} + C_{nl7} \cdot S^{*3}) \cdot C_\mu}, C_2 = \frac{C_{nl2}}{(C_{nl6} + C_{nl7} \cdot S^{*3}) \cdot C_\mu}, C_3 = \frac{C_{nl3}}{(C_{nl6} + C_{nl7} \cdot S^{*3}) \cdot C_\mu} \quad (11)$$

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

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

Постоянные в выражениях (7), (9), (11) и (12) приведены в табл. 3.

Таблица 3

Постоянные квадратичной k-ε-модели

Константа	Значение	Константа	Значение	Константа	Значение
C_a	1.44	C_{nl1}	0.75	C_{a0}	0.667
C_e	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	–	–

Перенос тепла рассчитывается при помощи уравнения энергии без учета влияния диссипации:

$$\rho \cdot C_p \cdot \sum_j V_j \cdot \frac{\partial T}{\partial x_j} = C_p \cdot \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_T}{Pr_T} \right) \cdot \frac{\partial T}{\partial x_j} \right], \quad (14)$$

Pr, Pr_T – молекулярное и турбулентное числа Прандтля соответственно.

На входе в расчетную область задавались граничные условия первого рода, на выходе – граничные условия второго рода, дополненные интегральным соотношением баланса массы, все внешние поверхности принимались идеально гладкими, неподвижными, адиабатическими стенками.

Для реализации математической модели использован программный комплекс STAR-CCM+, отличительной особенностью которого является возможность автоматического построения полиэдральных сеток, что важно ввиду сложной геометрии ячеек перемешивающих решеток.

Численное исследование течения и переноса тепла выполнено для семи- и 19-стержневых моделей ТВС ВВЭР-1000, заключенных в шестигранные чехлы, с установленными в них фрагментами сотовых решеток (рис. 2). Характерный поперечный размер контрольных объемов в областях входных и выходных участков стержневых пучков составлял 1 мм, в области установки решеток – 0.5 мм. Исследование пучков с малым числом стержней позволило сократить время счета и проанализировать влияние краевых эффектов (чехла) на полученные характеристики течения.

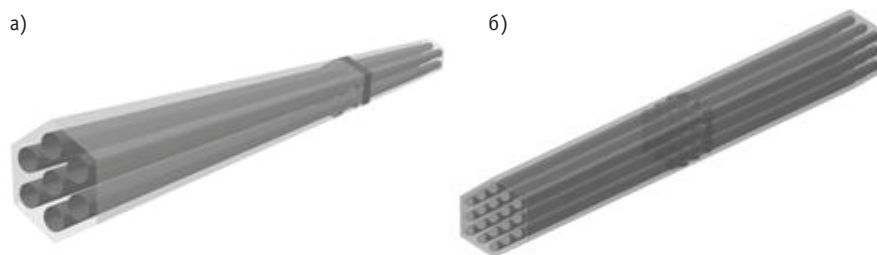


Рис. 2. Расчетные области семи- (а) и 19-стержневых (б) фрагментов ТВС ВВЭР-1000

Анализ распределений скоростей на выходе из 19-ячеистых решеток показал, что за ними без порядового чередования ячеек (СПР2, СДПР2) тангенциальные составляющие скорости взаимно компенсируются, что вызывает затухающую закрутку потока вокруг твэлов и в пространстве между ними. Направленный конвективный перенос реализуется лишь в области периферийного ряда твэлов и чехла (рис. 2б).

За решетками с порядовым чередованием двух типов ячеек (СПР1, СПР3,... СПР9, СДПР1) поток приобретает тангенциальную составляющую скорости, отличающуюся направлением (по или против часовой стрелки) в соседних рядах поля ячеек решетки. Между соседними рядами ячеек поперечные компоненты скорости на выходе из решеток ориентированы одинаково. Таким образом, конфигурация решеток обеспечивает формирование направленного конвективного переноса вдоль рядов твэлов, который сохраняется на некотором удалении вниз по течению за решетками (рис. 3а).

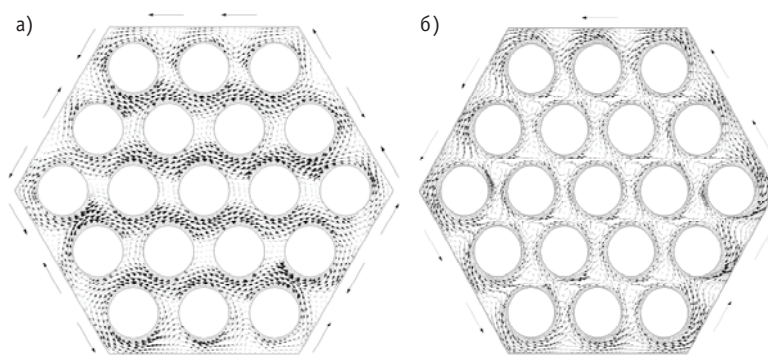


Рис. 3. Поля поперечных скоростей за сотовыми перемешивающими решетками: а) – с порядовым чередованием ячеек; б) – без порядового чередования ячеек

Следовательно, масштаб поперечного конвективного переноса за решетками с порядовым чередованием ячеек ограничен лишь поперечным размером чехла, в то время как за решетками с идентичными ячейками он ограничен шагом расположения твэлов.

Анализ распределений скорости за решетками в семистержневых пучках показал, что на вторичные течения определяющее влияние за решетками оказывают краевые эффекты. В связи с этим сделан вывод, что моделирование гидродинамики перемешивающих решеток с большим числом ячеек, создающих поперечные перетоки, на 7-ячеистых фрагментах нецелесообразно.

Для обобщения влияния геометрии сотовых интенсифицирующих решеток на их гидравлические и перемешивающие свойства были выбраны

- коэффициент гидравлического сопротивления решеток (КГС), являющийся

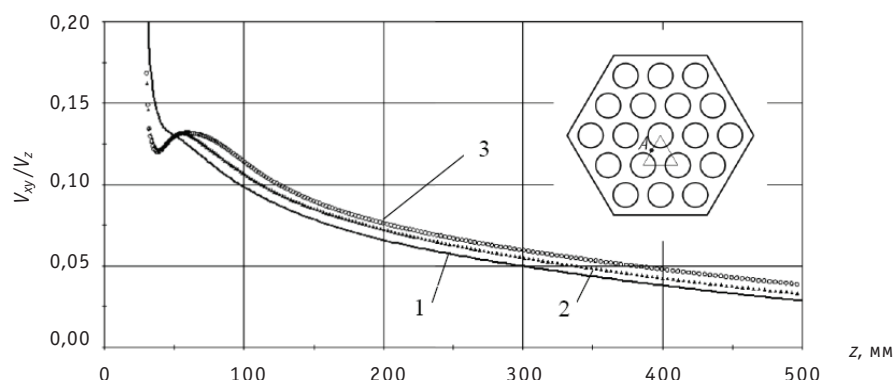


Рис. 4. Распределения относительной поперечной скорости за СДПР 1: 1 – $Re=3.03 \cdot 10^4$; 2 – $Re = 1.14 \cdot 10^5$; 3 – $Re = 4.64 \cdot 10^5$

мерой необратимых потерь энергии потока при его взаимодействии с решеткой;

- отношение характерной поперечной скорости V_{xy} к среднерасходной скорости в пучке V_z , определяющее «дальнобойность» решеток.

Величины КГС решеток при соответствующих числах Рейнольдса приведены в табл. 4. За характерную поперечную скорость V_{xy} выбрана скорость в узком сечении между центральным и соседним стержнями (точка А на рис. 4а). Изменение этой скорости при различных числах Рейнольдса за СДПР 1 приведено на рис. 4, а в табл. 4 помещены средние по длине значения V_{xy}/V_z на расстоянии типичного шага дистанционирующих решеток, выбранного равным 250 мм.

Таблица 4

Гидравлические и перемешивающие характеристики сотовых решеток

Тип решетки	Re	V_{xy} / V_z	КГС
СПР 1	$3.07 \cdot 10^4$	0.120	3.11
СПР 2	$3.07 \cdot 10^4$	–	3.15
СПР 3	$3.07 \cdot 10^4$	0.097	2.71
СПР 4	$3.07 \cdot 10^4$	0.132	3.07
СПР 5	$3.07 \cdot 10^4$	0.049	3.27
СПР 6	$3.07 \cdot 10^4$	0.177	1.49
СПР 7	$3.07 \cdot 10^4$	0.144	1.50
СПР 8	$3.07 \cdot 10^4$	0.091	0.85
СПР 9	$3.07 \cdot 10^4$	0.071	0.85
СДПР 1	$3.03 \cdot 10^4$	0.085	0.77
СДПР 2	$3.03 \cdot 10^4$	–	0.82
СДР	$3.07 \cdot 10^4$	–	0.45

Из полученных данных следует, что сотовые решетки с ячейками, имеющими шесть пуклевок (СПР1 – СПР5), обладают высоким коэффициентом гидравлического сопротивления. Это объясняется отрывом потока внутри ячеек и образованием застойных зон в области выхода потока из решеток. Изменение угла наклона

пуклевок (от 30 до 10^0) и отсутствие порядкового чередования ячеек в решетках сходной конструкции (СПР1, СПР2, СПР4, СПР5) слабо влияют на КГС.

Образование вихревых зон в выходном сечении ячеек связано с формированием струй, индуцирующих конвективный перенос, вследствие чего увеличение сопротивления таких решеток не приводит к пропорциональному увеличению их перемешивающих свойств. Уменьшение коэффициента гидравлического сопротивления (на $\sim 15\%$) имеет место при отсутствии поворота выходного сечения ячейки относительно входного (СПР1 и СПР3). Эффект связан с образованием сквозных осевых каналов в межъячеечном пространстве. Однако при этом ухудшаются перемешивающие свойства решетки, так как струи, выходящие из ячеек и инициирующие поперечную конвекцию, взаимодействуют с интенсивными не отклоненными от осевого движения потоками теплоносителя, выходящими из межъячеечного пространства. В результате относительная поперечная скорость уменьшается с 0.12 до 0.097.

Уменьшение числа пуклевок с шести до трех при длине ячеек 20 мм приводит к увеличению живого сечения для прохода теплоносителя внутри ячеек, снижению диффузорности, что уменьшает протяженность застойных зон в области выхода потока из решетки и, как следствие, гидравлические потери. При увеличении длины пуклевок до 30 мм обтекание внутренних поверхностей ячеек становится безотрывным. Это вызывает уменьшение КГС до величины $\sim 0.8-0.9$ при $Re \sim 3 \cdot 10^4$. Можно заключить, что при безотрывном течении во внутриячеечном канале сотовых решеток их гидравлическое сопротивление определяется длиной ячеек, числом пуклевок и слабо зависит от угла их наклона.

В целях исследования влияния числа Рейнольдса на гидравлические характеристики решеток выполнены расчеты КГС решеток СПР1 и СДПР1 в диапазоне чисел Рейнольдса $(0.3-4.6) \cdot 10^5$. Полученные результаты с погрешностью $\sim 5\%$ могут быть аппроксимированы соотношением

$$\frac{КГС}{КГС_0} = \left(\frac{Re}{Re_0} \right)^{-n}, \quad (15)$$

где $КГС_0$ – коэффициент гидравлического сопротивления решетки при Re_0 (см. табл. 4), $n = 0.17$ для СДПР1 и $n = 0.08$ для СПР1.

Снижение показателя степени в законе сопротивления решетки СПР1 по сравнению с показателем в законе сопротивления СДПР1 объясняется тем, что потери на трение в каналах СПР1, уменьшающиеся с ростом числа Рейнольдса, вносят слабый вклад в суммарные потери давления, в то время как для СДПР1, ячейки которой обтекаются безотрывно, эти потери являются определяющими.

Исследование переноса тепла в пучках стержней с сотовыми решетками осуществлялось методом теплового следа: на входе в пучок задавалась центральная температурная неравномерность (рис. 5а) и исследовалась ее деформация в потоке за решетками (рис. 5б–г).

В отсутствие направленного поперечного конвективного переноса (рис. 5б) температурная неоднородность локализована в пределах первого ряда стержней. Сравнение распределений температуры на входе в решетку (рис. 5а) и в сечении 250 мм за решеткой (рис. 5б) показывает слабое рассеяние неоднородности. Направленный конвективный перенос (рис. 5в, г) радикально изменяет распределение температурной неоднородности в поперечном сечении пучка. Наибольшее рассеяние имеет место за СПР6 ($n = 3$; $\varphi = 30^\circ$; $l = 20$ мм; $\psi = 60^\circ$), для которой относительная поперечная скорость V_{xy}/V_z максимальна и равна 0.177 (табл. 4). Для других решеток температурные поля близки, что отражает близость скоростей поперечной конвекции (табл. 4).

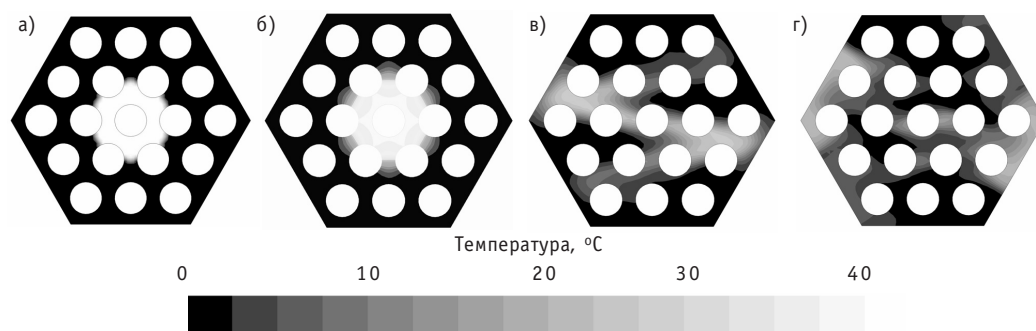


Рис. 5. Распределение температуры в пучках стержней с сотовыми решетками: а) – перед решетками; б) – на расстоянии 250 мм за СДР; в) – на расстоянии 250 мм за СДПР1; г) – на расстоянии 250 мм за СДПР6

По итогам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- выполнено численное моделирование течения и переноса тепла в моделях пучков твэлов ВВЭР-1000 с семью, 19-ю стержнями натурального размера, содержащих 11 вариантов конструктивных решений сотовых решеток конструкции ОАО «МЗС»;
- порядковое чередование ячеек, отличающихся углом наклона продольных гофр (пуклевок), является эффективным способом выравнивания температурных неоднородностей в потоке теплоносителя;
- увеличение длины ячеек, уменьшение числа пуклевок обеспечивают безотрывное течение в объеме ячеек, что позволяет уменьшить КГС решетки без существенного уменьшения перемешивающих свойств, зависящих от угла наклона пуклевок;
- с ростом числа Рейнольдса в диапазоне $(0.3-5) \cdot 10^5$ происходит уменьшение КГС решеток по степенному закону с показателем степени 0.17 для безотрывно обтекаемых решеток и 0.08 для решеток, в ячейках которых имеют место отрывы потока;
- перемешивающие свойства течения за решеткой, оцененные по величине средней относительной поперечной скорости, в том же диапазоне чисел Рейнольдса несколько увеличиваются (от 8.5 до 9.4% для СДПР1);
- на вторичное течение, индуцированное перемешивающими решетками, во фрагментах ТВС, состоящих из малого количества стержней (семь стержней), большое влияние оказывают краевые эффекты (эффект чехла).

Литература

1. Бородин С.С., Дмитриев С.М. и др. Исследование эффективности перемешивающих решеток в обоснование выбора оптимальной конструкции ТВСА-АЛЬФА реактора типа ВВЭР//Ядерная энергетика и техническая физика. – 2010.
2. Корсун А.С., Круглов В.Б., Маслов Ю.А. и др. Расчетное исследование циркуляции теплоносителя в ТВС с решетками перемешивающего типа//Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – № 23.
3. Солонин В.И. Решетки сотового типа для ВВЭР-1000//Журнал «Росэнергоатом». – 2008. – № 8.
4. Baglietto E. CFD in nuclear industry, a whole new role. М.: BMSTU, 2010.
5. Lien F., Chen W., Leschziner M. Low-Reynolds number eddy-viscosity modelling based on non-linear stress-strain/vorticity relations/Proc. III Symp. On Engineering Turbulence Modelling and Measurements, Greece, 1996.
6. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2001.

Поступила в редакцию 19.10.2011

A slider bearing working in the medium of the heavy liquid metal coolants is one of the main elements which influence the efficiency of the main circulating pumps in the reactor loops with HLMS.

The operating efficiency of the slider bearing is mainly determined with the correct choice of its constructive relation: a relative annular gap, relative width, angle of contact.

The results of the experimental research have shown that the difference between hydraulic characteristics of water and HLMS coolants in the experimental plot «throttle-annular gap» exists. It makes the usage of the traditional lubricating fluid in the methods of analysis of the hydrostatic sliding bearings for the pumps in the HLMS incorrect.

УДК 621.039.526

Calculations and Experimental Investigation of Irradiation Heat Rate in BOR-60 Reactor \A.V. Varivtsev, I.Yu. Zhemkov, O.V. Ishunina, Yu.V. Naboyschikov, V.A. Neverov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 8 pages, 2 tables, 4 illustrations. – References, 6 titles.

Calculations and experimental investigation of irradiation heat rate in reactor BOR-60 reveals drawbacks of modern calculational methods. Paper propose algorithm for irradiation heat rate calculations, which allows to eliminate these drawbacks.

УДК 621.039.543: 621.039.524.44

The Substantiation of the Correlation for Critical Heat Flux Calculation for Alternative Design Fuel Assemblies with Mixing Spacer Grids in VVER-1000 \S.M. Dmitriev, V.E. Lukyanov, O.B. Samoylov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 10 pages, 8 illustrations. – References, 6 titles.

The results of the experimental investigations of coolant mixing and departure from nucleate boiling in TVSA-T with combined spacer grids and mixing grids on aerodynamic and thermal test facilities are presented. As a result of the obtained experimental data, the determination of mixing coefficient was carried out and the CRT-1 correlation for the critical heat flux calculation was developed. The applicability of correlation for critical heat flux calculation for TVSA-T VVER-1000 was substantiated.

УДК 621.039.534.6

The Method Based on Electromagnetic Sensor for Measuring of Sodium Flow Rate in a Heat Pipe \N.I. Loginov, A.S. Mikheev, A.A. Mukhlinin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 8 pages, 5 illustrations. – References, 6 titles.

The electromagnetic sensor design and method of liquid flow measuring in the vertical sodium heat pipe 100 mm diameter and 10 m length at operating temperature 550–650°C are described. The heat pipe was supplied with capillary structure only in the evaporation zone, i.e. it was a thermosyphon with nonseparated opposite flows of liquid and vapor.

Magnetic field of the sensor was produced by permanent magnet, made of thermostable alloy, which is efficient up to 600 oC. Flow measurements at three cross sections of the heat pipe, at four «points» of circumference of each section, were carried out. Significant fluctuations of the local flow rate values were observed. Maximum amplitude of the fluctuations exceeds the average value of the flow rate up to 2-3 times. Negative values of the local flow rate were observed. It means that liquid sodium flowed against the gravity force, and this indicates that the liquid sodium entrainment caused by vapor counter-flow, the speed of which was about 80 m/s, took place.

УДК 621.039.517

The Intensification of Mass Transfer in LWR Rods Bundles by Cellular Mixing Grids \P.V. Markov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 9 pages, 4 tables, 5 illustrations. – References, 6 titles.

The CFD-models of 7-rods and 19-rods bundle with mixing grid was developed. The flow field in rods bundles was investigated. A series of CFD analyses were performed to obtain hydraulic and mixing properties of mixing cellular grids.