

Марков Павел Владимирович

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОТОВЫХ
ПЕРЕМЕШИВАЮЩИХ РЕШЕТОК С НАПРАВЛЕННЫМ
КОНВЕКТИВНЫМ ПЕРЕНОСОМ

05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование,
эксплуатацию и вывод из эксплуатации

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Москва – 2012

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Солонин В.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Хвесюк В.И.

кандидат технических наук,
Афремов Д.А.

Ведущая организация: ОАО «Машиностроительный
завод», г. Электросталь

Защита состоится 21 марта 2012 г. в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.08 в Московском государственном техническом университете по адресу: 105005, г. Москва, Лефортовская набережная, д.1, ф-т «Энергомашиностроение».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Ваш отзыв на автореферат в 2-х экз., заверенный печатью организации, просим выслать по адресу: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.08.

Автореферат разослан « » февраля 2012 г.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1988041

Марков П.В. Гидродинамическ

Ученый секретарь диссертационного
совета, кандидат технических наук,
доцент

Перевезенцев В.В.

Актуальность исследования

Актуальность работ по созданию интенсифицирующих решеток для тепловыделяющих сборок (ТВС) отечественных атомных реакторов типа ВВЭР обусловлена как необходимостью повышения мощности существующих блоков, так и созданием новых блоков повышенной безопасности. Интенсифицирующие решетки должны снижать неравномерности теплотехнических характеристик потока теплоносителя в сечениях ТВС, вызванные геометрией трактов охлаждения, представляющих собой совокупность взаимосвязанных каналов сложной формы, 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, является причиной локальных увеличений температуры оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), их последующей разгерметизации, выхода 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 70^х годов прошлого века, для реакторов РБМК-1500 (80^е годы прошлого века), развиты для реакторов ВВЭР в связи с принятыми программами развития ядерной энергетики России в XXI веке.

В настоящем исследовании анализируются интенсифицирующие межъячейный обмен в ТВС ВВЭР модернизированные сотовые решетки, предложенные к использованию ОАО «Машиностроительный завод» г. Электросталь.

Традиционные конструкции таких решеток обеспечивают дистанционирование ТВЭЛов в пучке продольными гофрами (пуклевками), геометрия которых сохраняет осевое направление скорости и турбулизирует поток. ОАО «МСЗ» предложено исследовать перемешивающие свойства модифицированных конструкций сотовых решеток, отличающихся тем, что пуклевки на ячейках (сотах) решеток расположены под углом к оси ТВЭЛ. Это технологически обоснованное решение приводит к интенсификации перемешивания потока за решетками не только за счет турбулизации потока, но и за счет создания компонент скорости в направлении, перпендикулярном основному течению теплоносителя (направленного конвективного переноса). Подобное воздействие на поток приводит к большим потерям энергии в решетке по сравнению со штатной дистанционирующей решеткой. Поэтому задачей исследования являлось определение оптимальных характеристик возможных конструкций сотовых решеток, обладающих приемлемым

гидравлическим сопротивлением и необходимыми перемешивающими свойствами.

Цель работы

Исследование различных вариантов сотовых решеток, создающих поперечный конвективный перенос, повышающих турбулентное перемешивание в потоке; выбор предпочтительного варианта, обладающего приемлемыми перемешивающими характеристиками при приемлемом значении коэффициента гидравлического сопротивления.

Задачи исследования

- Выбор математической модели для исследования течения, переноса тепла в фрагментах пучков твэлов, содержащих сотовые дистанционирующие и перемешивающие решетки. Оценка погрешностей моделирования.
- Численное моделирование течения в пучках с сотовыми перемешивающими решетками, отличающимися числом и длиной ячеек, числом и углом наклона пучков, углом поворота поперечного сечения ячеек от входа до выхода.
- Обоснование диапазонов изменения геометрических параметров моделируемых решеток, условий моделирования и их влияния на гидравлическое сопротивление, конвективный перенос, перемешивающие характеристики потока.
- Анализ влияния геометрических параметров сотовых решеток на их гидравлические, перемешивающие характеристики, образование поперечной конвекции.
- Численное исследование гидродинамики и переноса тепла в пучке с предпочтительным вариантом решетки, анализ влияния направляющих каналов под поглощающие стержни системы управления и защиты на характеристики перемешивания.
- Использование результатов физического моделирования течения и теплообмена с целью валидации результатов численных расчетов.

Научная новизна

- Впервые проведено численное моделирование течения и переноса тепла в пучках стержней с сотовыми перемешивающими решетками. Выполнен анализ погрешностей моделирования, оцененный отклонениями в 5 – 7 %. Получены гидравлические и перемешивающие характеристики различных вариантов решеток, установленных в 7-ми, 19-ти и 127-ми стержневых пучках. Выполнен анализ механизма формирования направленной поперечной конвекции.
- Впервые численно исследовано влияние геометрии ячеек сотовых решеток на гидродинамику течения, гидравлические и перемешивающие характеристики потока в пучке твэлов.

- На аэродинамическом стенде получены новые данные о гидравлическом сопротивлении и интенсификации межъячеистого обмена в 19-ти и 127-ми стержневых пучках сотовыми решетками методом теплового следа. Продемонстрировано соответствие экспериментальных результатов данным, полученным при численном моделировании.
- Получены рекомендации по учету влияния сжимаемости потока воздуха на величину гидравлического сопротивления решеток в аэродинамических экспериментах.

Практическая ценность

- Создана методика численного моделирования течения теплоносителя в ТВС ВВЭР в области дистанционирующих перемешивающих решеток сотового типа, находящаяся в соответствии с данными экспериментов, позволяющая оптимизировать характеристики решеток.
- Получены данные о связи геометрии ячеек решеток с характеристиками конвективного переноса, турбулентного обмена в потоке, сформированном решеткой в пучке стержневых твэлов.
- Обоснован выбор характеристик ячеек дистанционирующих решеток для использования в ТВС нового поколения водо-водяных реакторов под давлением.
- Проведенные исследования использованы при выборе конструктивных характеристик сотовой дистанционирующей перемешивающей решетки для ТВС нового поколения водо-водяных реакторов под давлением в ОАО «МСЗ».
- Методика численного моделирования течения теплоносителя в пучках стержней в области перемешивающих решеток может быть использована для выбора оптимальных конструктивных решений других вариантов перемешивающих – дистанционирующих решеток для реакторов ВВЭР и PWR.

Достоверность результатов

Достоверность результатов обеспечивается использованием апробированных моделей течения и переноса тепла в потоках вязкой жидкости, проведением анализа влияния выбора замыкающих соотношений и метода решения на полученные результаты, валидацией результатов расчетов.

Основные научные положения и выводы по работе хорошо согласуются с современными представлениями о процессах гидродинамики и переноса тепла при турбулентном течении в пучках цилиндрических стержней.

Основные положения, выносимые на защиту

Математическая модель для исследования течения, переноса тепла в фрагментах пучков твэлов, содержащих сотовые перемешивающие решетки.

Результаты численных и экспериментальных исследований гидродинамики и переноса тепла в пучках стержней с сотовыми перемешивающими решетками.

Апробация работы

Основные положения и результаты работы были представлены и получили одобрение на следующих конференциях и семинарах: «Семинар - совещание по вопросам интенсификации теплообмена в ТВС ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200», Обнинск, 2009, 2010, 2011; «Будущее машиностроение России», Москва, 2010, 2011; «Безопасность АЭС и подготовка кадров», Обнинск, 2011; на научно-технических семинарах кафедры «Ядерные реакторы и установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Публикации

Основные результаты работ опубликованы в 6 работах, в том числе 3 статьи в реферируемых журналах из списка ВАК.

Личный вклад автора

Работа выполнена на кафедре «Ядерные реакторы и установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Постановка задачи исследования осуществлена совместно с научным руководителем. Разработка математических моделей, проведение расчетов, обработка и анализ результатов выполнены автором самостоятельно. Автор в составе исследовательского коллектива УНЦ «НУКЛОН» принимал непосредственное участие в создании экспериментальных стендов, обработке и анализе данных экспериментальных исследований.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и списка используемых источников. Работа изложена на 135 страницах, включая 77 рисунков, 22 таблицы и списка используемых источников из 72 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, указана новизна и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе описаны механизмы перемешивания теплоносителя в пучках стержневых твэлов ядерных реакторов, проведен анализ экспериментальных данных о коэффициенте перемешивания при течении теплоносителей с числами Прандтля близкими к единице. Выполнен обзор конструкций перемешивающих решеток для зарубежных водо-водяных

реакторов. Описаны интенсифицирующие решетки для реакторов РБМК. Приведены конструкции сотовых и пластинчатых перемешивающих решеток, предлагаемых к использованию в ТВС реакторов ВВЭР, описаны методики их исследования. Обоснован выбор сотовых решеток, ячейки которых имеют наклонные к оси ТВС гофры (пуклевки), инициирующие отклонение скорости и повышающие турбулентность потока, в качестве перемешивающих решеток для ТВС водо-водяных реакторов нового поколения. В конце главы сформулированы цели и задачи исследования.

Во второй главе описана математическая модель гидродинамики и переноса тепла в пучках стержней с сотовыми перемешивающими решетками, приведены допущения, расчетные области и метод решения.

Рассматриваемая математическая модель базируется на системе уравнений движения вязкой турбулентной среды:

- баланса количества движения:

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

- баланса массы:

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

- выражений для компонент тензора напряжений и тензора скоростей деформаций:

$$\tau_{ij} = 2 \cdot \mu \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \cdot \sum_k \frac{\partial V_k}{\partial x_k} \cdot \delta_{ij} - \rho \cdot \overline{V'_i \cdot V'_j}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right), \quad \delta_{ij} - \text{оператор Кронекера.} \quad (3)$$

Так как течение в каналах, образованных ячейками сотовых перемешивающих решеток, происходит по криволинейным траекториям, имеет место анизотропия и закрутка потока, то для замыкания системы уравнений движения выбрана квадратичная $k - \epsilon$ модель, в которой турбулентные напряжения $-\rho \cdot \overline{V'_i \cdot V'_j}$ определяются через тензор анизотропии:

$$-\rho \cdot \overline{V'_i \cdot V'_j} = 2 \cdot \mu_T \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \cdot \left[\mu_T \cdot \sum_k \frac{\partial V_k}{\partial x_k} + \rho \cdot k \right] \cdot \delta_{ij} - 4 \cdot C_1 \cdot \mu_T \cdot \frac{k}{\epsilon} \cdot \left[\sum_k S_{ik} \cdot S_{kj} - \frac{1}{3} \sum_k \sum_l S_{kl} \cdot S_{kl} \cdot \delta_{ij} \right] - 4 \cdot C_2 \cdot \mu_T \cdot \frac{k}{\epsilon} \cdot \left[\sum_k \omega_{ik} \cdot S_{kj} + \sum_k \omega_{jk} \cdot S_{ki} \right] - 4 \cdot C_3 \cdot \mu_T \cdot \frac{k}{\epsilon} \cdot \left[\sum_k \omega_{ik} \cdot \omega_{kj} - \frac{1}{3} \sum_k \sum_l \omega_{kl} \cdot \omega_{kl} \cdot \delta_{ij} \right], \quad (4)$$

где компоненты тензора завихренности:

$$\omega_{ij} = \frac{\partial V_i}{\partial x_j} - \frac{\partial V_j}{\partial x_i}. \quad (5)$$

Кинетическая энергия турбулентности определяется из уравнения

$$\rho \cdot \sum_j V_j \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} = \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_T \cdot P - \rho \cdot \epsilon, \quad P = - \frac{1}{\mu_T} \cdot \sum_i \sum_j \rho \cdot \overline{V'_i \cdot V'_j} \cdot \frac{\partial V_i}{\partial x_j}. \quad (6)$$

Уравнение для скорости диссипации кинетической энергии:

$$\rho \cdot \sum_j V_j \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} \cdot \left(C_{\varepsilon 1} \cdot \mu_T \cdot P - C_{\varepsilon 2} \cdot \rho \cdot \varepsilon + C_{\varepsilon 4} \cdot \rho \cdot k \cdot \sum_j \frac{\partial V_j}{\partial x_j} \right). \quad (7)$$

Турбулентная вязкость:

$$\mu_T = \frac{C_\mu \cdot \rho \cdot k^2}{\varepsilon}. \quad (8)$$

Коэффициенты квадратичной модели:

$$C_1 = \frac{C_{nl1}}{(C_{nl6} + C_{nl7} \cdot S^{*3}) \cdot C_\mu}, C_2 = \frac{C_{nl2}}{(C_{nl6} + C_{nl7} \cdot S^{*3}) \cdot C_\mu}, C_3 = \frac{C_{nl3}}{(C_{nl6} + C_{nl7} \cdot S^{*3}) \cdot C_\mu}, \quad (9)$$

$$C_\mu = \frac{C_{a0}}{C_{a1} + C_{a2} \cdot S^* + C_{a3} \cdot \omega^*}, \quad (10)$$

$$S^* = \frac{k}{\varepsilon} \cdot \sqrt{2 \cdot \sum_i \sum_j S_{ij} \cdot S_{ij}}, \quad \omega^* = \frac{k}{\varepsilon} \cdot \sqrt{2 \cdot \sum_i \sum_j \omega_{ij} \cdot \omega_{ij}}. \quad (11)$$

Постоянные в выражениях (6), (7), (9) и (10) приведены в таблице 1.

Таблица 1

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
σ_k	1.0	C_{nl6}	1000	C_{a3}	0.9
σ_ε	1.3	C_{nl7}	1	-	-

Перенос тепла рассчитывается при помощи уравнения энергии:

$$\rho \cdot C_p \cdot \sum_j V_j \cdot \frac{\partial T}{\partial x_j} = C_p \cdot \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_T}{Pr_T} \right) \cdot \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] + \sum_j V_j \cdot \frac{\partial p}{\partial x_j} + \sum_i \sum_j \tau_{ij} \cdot \frac{\partial V_i}{\partial x_j}, \quad (12)$$

Pr , Pr_T – молекулярное и турбулентное число Прандтля, соответственно.

Во входном сечении задается граничное условие первого рода, на выходе – граничное условие второго рода, дополненное интегральным условием сохранения массы. На твердых поверхностях выполняется условие прилипания. На не обогреваемых твердых поверхностях задается условие адиабатической стенки. На обогреваемых поверхностях – постоянный тепловой поток.

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

В третьей главе приведены результаты численного исследования течения и переноса тепла в 7-ми и 19-ти стержневых пучках с сотовыми перемешивающими решетками. Исследованы решетки, выполненные из двух типов чашек (рис. 1-а), отличающихся только направлением наклона пучков.

Каждый тип ячеек располагается в последовательных плоских рядах, которые чередуются по сечению решетки.

Для оптимизации конструкции решетки изменению могут подлежать следующие параметры ячеек (рис. 1-6): длина l , определяющая жесткость решетки, упругие свойства пучков и гидравлическое сопротивление решетки; количество пучков n , которое влияет на загромождение сечения, деформацию потока в каналах, образованных стержнями и поверхностью ячеек, гидравлическое сопротивление; угол наклона пучков 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.

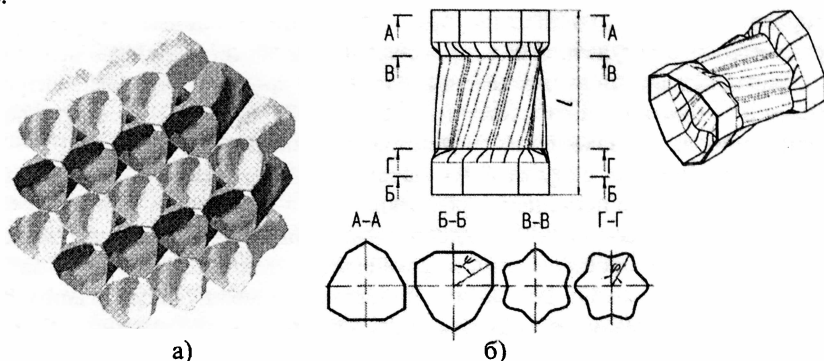


Рис. 1. Конструкция перемешивающей решетки: а) – внешний вид варианта 19-ти ячейистого фрагмента сотовой перемешивающей решетки с направленным конвективным переносом; б) – вариант исполнения ячейки и параметры, подлежащие изменению

Геометрия пучка твэлов, технологические возможности производства, требования, предъявляемые к жесткости решетки, накладывают ограничения на перечисленные параметры (таблица 2). 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.

В пределах ограничений, приведенных в таблице 2, были созданы виртуальные модели 11-ти вариантов сотовых решеток (таблица 3). Часть моделей была выполнена как перемешивающие (СПР) с диаметром вписанного в ячейку цилиндра большим, чем диаметр твэла. Другая часть моделей выполнена в предположении, что решетка может обеспечивать и дистанционирование твэлов (стержни устанавливаются в решетку с натягом). Такие решетки именуются как сотовые дистанционирующие перемешивающие решетки (СДПР). Последняя модель решетки таблицы 3 соответствует штатной сотовой дистанционирующей решетке (СДР).

Ограничения, наложенные на геометрию ячеек решеток

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

Выполнен анализ влияния расчетных моделей и плотности расчетной сетки на результаты численного моделирования, показавший, что при противопоточной схеме дискретизации конвективных членов первого порядка точности, количестве контрольных объемов в расчетных областях ~ 3 млн., реализованных в расчетах, отклонения локальных распределений скоростей достигают 10 %, отклонения интегральных характеристик (КГС, перепады давлений на макетах) – 5-7 %. Сравнение проводилось с данными, полученными с использованием противопоточной схемы дискретизации второго порядка точности, при этом интегральные характеристики сравнивались с результатами аппроксимации на «бесконечность» величин КГС и перепадов давления, определенных при варьировании числом контрольных объемов в расчетной области ($\sim 0.8, 3.0, 8.5$ млн.), в предположении экспоненциальных законов их зависимостей от плотности сетки.

Распределения скоростей на выходе из 19-ти ячеистых решеток зависят от конструктивного исполнения решетки.

За решетками без порядкового чередования ячеек тангенциальные составляющие скорости взаимно компенсируются, что вызывает затухание закрутки потока вокруг твэлов и в пространстве между ними. Направленный конвективный перенос реализуется лишь в области периферийного ряда твэлов и чехла (рис. 2-б).

За решетками с порядковым чередованием двух типов ячеек поток приобретает тангенциальную составляющую скорости, отличающуюся направлением 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 слоев твэлов (рис. 2-а), затухающего на расстоянии около 30 – 40 гидравлических диаметров за решетками.

Следовательно, масштаб поперечного конвективного переноса за решетками с порядковым 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 7-ми стержневых 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-ми ячеистых фрагментах нецелесообразно.

Для обобщения влияния геометрии сотовых интенсифицирующих решеток на их гидравлические и перемешивающие свойства были выбраны: коэффициент гидравлического сопротивления решеток (КГС), являющийся мерой необратимых потерь энергии потока при его взаимодействии с решеткой; отношение характерной поперечной скорости V_{xy} к среднерасходной скорости в пучке V_z , определяющее уровень конвективного переноса.

Величины КГС решеток, определенные по результатам численного моделирования, приведены в таблице 3. За характерную поперечную скорость V_{xy} выбрана скорость в узком сечении между центральным и соседним стержнями (точка А на рис. 3). Изменение этой скорости при различных числах Рейнольдса за решеткой СДПР 1 приведено на рис. 3, а в таблице 3 помещены средние по длине значения V_{xy}/V_z на расстоянии типичного шага дистанционирующих решеток, выбранного равным 250 мм.

Кроме того, перемешивающие свойства решеток характеризуются в таблице 3 эффективным коэффициентом перемешивания $\mu_{\text{эф}}$, который был получен по результатам численного моделирования переноса тепла в пучках стержней с сотовыми решетками (СПР 1, СПР 6, СПР 8, СДПР 1, СДР). Исследования проводились методом теплового следа: на входе в пучок задавалась центральная температурная неоднородность, далее отслеживалось ее развитие в потоке теплоносителя за решетками.

В целях исследования влияния числа Рейнольдса на гидравлические характеристики решеток выполнены расчеты КГС решеток СПР 1 и СДПР 1 в диапазоне чисел Рейнольдса $(0.3 - 4.6) \cdot 10^5$. Согласно полученным результатам в рассматриваемом диапазоне происходит уменьшение величин КГС с ростом числа Рейнольдса по степенному закону с показателями степени -0.17 для решетки СДПР 1 и -0.08 для решетки СПР 1. Уменьшение показателя степени свидетельствует о снижении роли трения в гидравлических потерях на решетке.

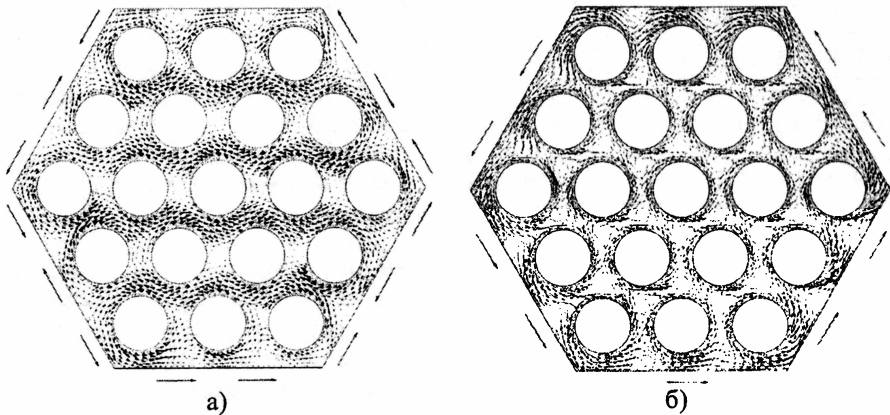


Рис. 2. Поля поперечных скоростей за сотовыми перемешивающими решетками на расстоянии 100 мм от решеток: а) – за решеткой с порядковым чередованием ячеек; б) – за решеткой без порядкового чередования ячеек

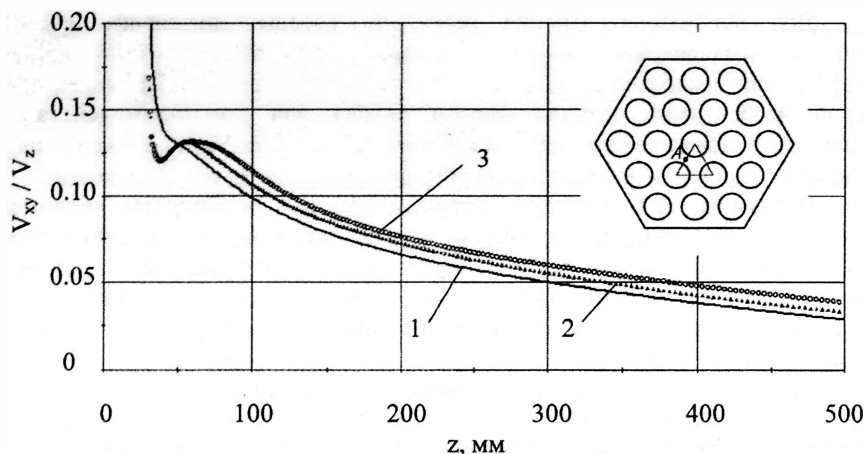


Рис. 3. Распределения относительной поперечной скорости за СДПР 1:
1 – $Re = 3.03 \cdot 10^4$, 2 – $Re = 1.14 \cdot 10^5$, 3 – $Re = 4.64 \cdot 10^5$

Таблица 3

Наименования, параметры и характеристики сотовых решеток

Вариант решетки	Порядковое чередова- ние ячеек	l, мм	n	φ , град	ψ , град	Re	V_{xy}/V_z	КГС	$\mu_{эф}/\mu_{ст}$
СПР 1	есть	20	6	30	60	$3.07 \cdot 10^4$	0.120	3.11	9.7
СПР 2	нет	20	6	30	60	$3.07 \cdot 10^4$	-	3.15	-
СПР 3	есть	20	6	30	0	$3.07 \cdot 10^4$	0.097	2.71	-
СПР 4	есть	20	6	20	60	$3.07 \cdot 10^4$	0.132	3.07	-
СПР 5	есть	20	6	10	60	$3.07 \cdot 10^4$	0.049	3.27	-
СПР 6	есть	20	3	30	60	$3.07 \cdot 10^4$	0.124	0.99	11.9
СПР 7	есть	20	3	20	60	$3.07 \cdot 10^4$	0.101	0.99	-
СПР 8	есть	30	3	30	60	$3.07 \cdot 10^4$	0.091	0.85	7.2
СПР 9	есть	30	3	20	60	$3.07 \cdot 10^4$	0.071	0.85	-
СДПР 1	есть	30	3	20	60	$3.03 \cdot 10^4$	0.085	0.77	6.9
СДПР 2	нет	30	3	20	60	$3.03 \cdot 10^4$	-	0.82	-
СДР	нет	20	3	0	0	$3.07 \cdot 10^4$	-	0.45	1.1

Примечание: $\mu_{ст}$ – коэффициент перемешивания при стабилизированном течении в пучке твэлов без решеток.

Данные исследования гидродинамики и переноса тепла в 19-ти стержневых пучках показали, что в технологически реализуемом (таблица 2) диапазоне варьируемых параметров сотовых решеток отсутствует такой, который обладает и наименьшим коэффициентом гидравлического сопротивления, и наилучшими перемешивающими характеристиками.

Этот результат физически объясним неизбежным ростом потерь на создание поперечного течения, интенсифицирующего перемешивание. В то же время физически понятно, что реализация безотрывного течения в решетке, способствующего уменьшению гидравлических потерь, и оптимальная

поперечная компонента скорости, обеспечивающая приемлемый конвективный перенос при допустимом гидравлическом сопротивлении, могут быть параметрами оптимизации при выборе предпочтительного (субоптимального) варианта решетки.

В работе использован один из возможных методов решения задач оптимизации – «Метод смещенного идеала».

В ходе проведенного по методу смещенного идеала исследования субоптимальным вариантом оказалась сотовая дистанционирующая перемешивающая решетка СДПР 1.

В четвертой главе приведены результаты численного исследования течения и переноса тепла в 127-ми стержневом пучке, состоящим из 126 оболочек твэлов и центральной трубы большего, чем твэл, диаметра, имитирующей направляющий канал под поглощающие стержни системы управления и защиты ТВС ВВЭР-1000. В пучке установлена сотовая дистанционирующая перемешивающая решетка СДПР 1 – 127 со 126 ячейками типа использованных в решетке СДПР 1, в месте размещения центральной трубы ячейка отсутствует и дистанционирование осуществляется окружающими трубку внешними поверхностями ячеек решетки. Кроме того, в решетке СДПР 1 – 127 выполнен наружный шестигранный обод, герметизирующий межъячеечное пространство решетки. Геометрия ячеек в периферийном ряду решетки поэтому отличается от геометрии ячеек центрального поля наличием поверхностей для сопряжения с пластинами обода.

На входе в пучок задавалась осесимметричная температурная неоднородность (рис. 4-а), при взаимодействии которой с решеткой под действием механизмов перемешивания в объеме решетки (слабое влияние) и за решеткой (конвекция и турбулентная диффузия, сильное влияние) происходит деформация поля температуры, рассеяние температурной неоднородности (рис. 4-б).

Уменьшение разности температур (по сравнению с исходной) в области регулярной решетки стержней в пределах 250 мм за решеткой составляет ~ 30 %, что подтверждает хорошие перемешивающие характеристики решетки: за двумя или тремя последовательно установленными решетками температурная неоднородность уменьшится в два и три раза.

При приближении к центральной трубке скорость поперечного течения между слоями твэлов уменьшается. Таким образом, центральная трубка (направляющие каналы) ограничивает протяженность области интенсивного поперечного конвективного переноса, частично изолирует потоки, обеспечивающие поперечную конвекцию.

Как видно из рис. 5, затухание поперечной скорости близ центральной трубки, а также углового стержня происходит более интенсивно, чем в области регулярной решетки стержней. Среднее значение поперечной скорости на расстоянии 250 мм за решеткой вдоль линии 1 составляет ~ 9% от средней скорости, вдоль линий 2, 3 – ~ 7%.

Таким образом, центральная труба (направляющие каналы) ограничивает протяженность области интенсивного поперечного конвективного переноса.

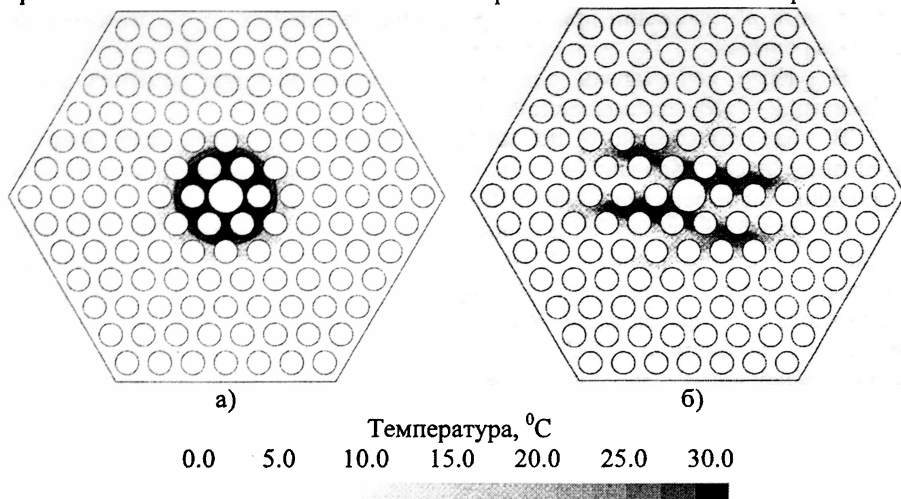


Рис. 4. Поля температур: а) – перед решеткой, б) – на расстоянии 250 мм за решеткой

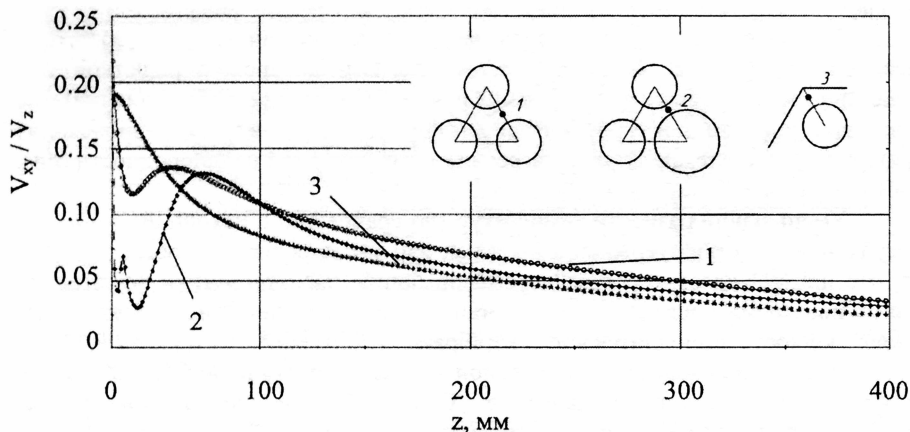


Рис. 5. Распределения относительных поперечных скоростей в различных ячейках пучка при удалении от решетки СДПР 1 – 127

При моделировании течения через решетку СДПР 1 – 127 обод решетки исключал зазор между чехлом и периферийными ячейками. Это привело к увеличению расхода, проходящего внутри ячеек, до величины ~ 70 % (в 19-ти стержневой сборке – 60 %). Геометрия модели обеспечивала отсутствие байпасного течения между решеткой и внутренней поверхностью чехла,

которое имело место в 19-ти стержневом пучке. Поскольку байпас уменьшает деформацию потока решеткой, то гидравлическое сопротивление СДПР 1 – 127 оказалось значительно превышающим сопротивление СДПР 1 и равным по величине КГС 1.38 при $Re = 3.72 \cdot 10^4$.

Проанализировано влияние течения, формируемого СДПР 1 – 127 на интенсивность турбулентного диффузионного обмена. Интенсивность турбулизующего воздействия перемешивающих решеток, согласно обобщению результатов моделирования, определяется их коэффициентом гидравлического сопротивления и с погрешностью $\pm 20\%$ может быть представлена выражением

$$\frac{a_T(z) - a_T^{cm}}{a_T^{cm}} = 0.23 \cdot \sqrt{KGS}, \quad (13)$$

где $a_T(z)$ – турбулентная температуропроводность в сечении канала, осредненная на расстоянии $z = 250$ мм от решетки; a_T^{cm} – турбулентная температуропроводность в пучке при стабилизированном течении.

Анализ безразмерных величин в уравнении энергии свидетельствует о преобладающей роли направленного конвективного переноса (по сравнению с диффузионным переносом) в процессе интенсификации поперечного обмена за сотовыми перемешивающими решетками. При этом важно отметить, что поперечная конвекция существенно увеличивает поверхность для диффузионного обмена.

В пятой главе приводятся результаты экспериментального исследования гидравлических и перемешивающих характеристик решеток СДПР 1 и СДПР 1 – 127, выполненного на аэродинамическом стенде, использованные для валидации методик расчета.

Так как скорости воздуха в макетах были относительно высоки (60 – 90 м/с), КГС решеток рассчитывался с учетом влияния на него сжимаемости потока. Из анализа безразмерных уравнений движения сжимаемого газа получено, что мерой влияния сжимаемости на турбулентное течение может служить параметр $Eu \cdot M^2$, а роль сжимаемости в первом приближении можно оценить по выражению

$$KGS_{сж} = KGS_n \cdot (1 + M^2 \cdot Eu), \quad (14)$$

где $KGS_{сж}$ – коэффициент гидравлического сопротивления при течении сжимаемого газа, KGS_n – коэффициент гидравлического сопротивления при течении жидкости постоянной плотности при том же числе Рейнольдса, $Eu = 2 \cdot KGS_{сж}$ – число Эйлера, M – число Маха.

Коэффициенты гидравлического сопротивления решеток СДПР 1 и СДПР 1 – 127 в условиях аэродинамического эксперимента ($KGS_{сж}$) приведены в таблице 4. В таблице 4 приведены полученные по формуле (14) KGS_n для случая несжимаемой жидкости при том же числе Рейнольдса.

При течении несжимаемой жидкости КГС на 4...11 % ниже, чем при течении сжимаемого газа при том же значении числа Рейнольдса в диапазоне чисел Маха в пучке от 0.1 до 0.26.

Различия между расчетными и экспериментальными значениями КГС решеток СДПР 1 и СДПР 1 – 127 при соответствующих числах Рейнольдса не превышают 10 %.

Сравнение распределений осевых скоростей между вторым и третьим горизонтальными рядами стержней на удалении 110 мм вниз по течению за решеткой, приведенное на рис. 6-а, показывает хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных: среднее квадратичное отклонение ($\sigma = 4.6 \%$) близко к погрешности эксперимента ($\sigma, = 3 \%$). Сравнение расчетных и экспериментальных распределений температур в том же сечении (рис. 6-б), показывает их соответствие в пределах 18.6 % по величине среднего квадратичного отклонения. Большое отклонение температурных распределений связано с тем, что в экспериментах и расчетах получены отличающиеся распределения температуры перед решеткой СДПР 1 – 127. Поэтому погрешность температурных распределений отражает суммарное различие процессов в экспериментальном стенде и его численной модели и ее величину (18.6 %) следует считать удовлетворительной.

Таблица 4

КГС фрагментов сотовой дистанционирующей перемешивающей решетки

Тип решетки	Re	M	КГС _{сж}	КГС _н
СДПР 1	$5.29 \cdot 10^4$	0.259	0.87	0.78
	$4.15 \cdot 10^4$	0.216	0.83	0.77
	$3.12 \cdot 10^4$	0.169	0.90	0.86
СДПР 1 – 127	$3.72 \cdot 10^4$	0.173	1.41	1.30
	$2.99 \cdot 10^4$	0.143	1.51	1.42
	$2.16 \cdot 10^4$	0.105	1.61	1.55

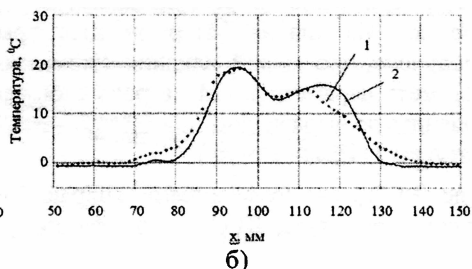
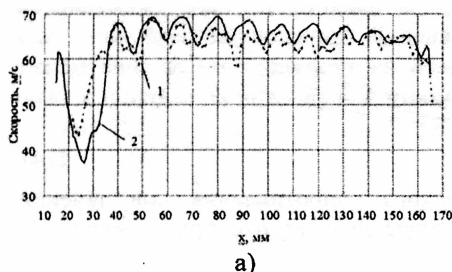


Рис. 6. Экспериментальные (1) и расчетные (2) распределения локальных характеристик потока на расстоянии 110 мм за решеткой СДПР 1 – 127 между вторым и третьим рядами стержней: а) – распределения осевой скорости; б) – распределения температуры

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработана методика численного моделирования течения и переноса тепла в пучках стержней с сотовыми перемешивающими решетками, создающими потоки со значительными поперечными компонентами средней скорости, базирующаяся на осредненных уравнениях движения вязкой турбулентной среды, замыкаемых с использованием квадратичной $k-\epsilon$ модели.

2. Выполнено численное моделирование течения и переноса тепла в фрагментах пучков твэлов ВВЭР-1000 при размещении в пучках 12 моделей сотовых решеток, базирующихся на конструктивных решениях ОАО «МСЗ».

3. Выполнена валидация результатов численного моделирования с использованием экспериментальных исследований пучков стержней с 19-тью и 126-тью ячеистыми сотовыми решетками, проведенных в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Показано удовлетворительное соответствие распределений скоростей ($\sigma \sim 5\%$) и температур ($\sigma \sim 20\%$), величин КГС (в пределах 6 – 10 %) при учете роли сжимаемости потока в экспериментах ($M < 0.3$).

4. Результаты численного моделирования течения в объеме решеток, показали, что:

- порядковое чередование ячеек, отличающихся направлением угла наклон гофр (пуклевок) в соседних рядах, является эффективным способом увеличения конвективного поперечного переноса в пучках стержней;

- увеличение длины ячеек, уменьшение числа пуклевок обеспечивает безотрывное течение в объеме ячеек, что позволяет уменьшить КГС решетки без существенного уменьшения перемешивающих свойств, зависящих от угла наклона пуклевок;

- величина КГС оптимальных решеток составляет ~ 0.9 при $Re \sim 5 \cdot 10^5$ и изменяется в диапазоне чисел Рейнольдса от $3 \cdot 10^4$ до $5 \cdot 10^5$ по степенному закону с показателем степени - 0.2;

- при использовании оптимальных сотовых дистанционирующих решеток гидравлические потери на них сравнимы (несколько ниже) с гидравлическими потерями на штатной дистанционирующей и дополнительной перемешивающей решетках, установленных последовательно;

- перемешивающие свойства течения за оптимальной решеткой, оцененные по величине средней относительной поперечной скорости, в диапазоне чисел Рейнольдса от $3 \cdot 10^4$ до $5 \cdot 10^5$ изменяются от 8.5 % до 9.4 %, а эффективный коэффициент перемешивания превышает коэффициент перемешивания стабилизированного течения в 7 раз;

- интенсивность массообмена в областях потока в окрестности направляющих каналов большего диаметра ниже, чем в области регулярной решетки твэлов (на ~ 25 % по величине средней относительной поперечной скорости) для геометрии ТВС ВВЭР-1000.

5. Результаты работы использованы ОАО «МСЗ» при выборе конструктивных характеристик сотовой дистанционирующей

перемешивающей решетки, создающей направленный конвективный перенос, для ТВС нового поколения водо-водяных реакторов под давлением.

Основные публикации по теме диссертации:

1. Марков П.В., Солонин В.И. Моделирование течения в пучке цилиндрических твэлов реактора ВВЭР, дистанционированных сотовой решеткой // Вестник МГТУ. Машиностроение. 2011. № 3. С. 17 – 29.

2. Солонин В.И., Марков П.В. Гидродинамика сотовой решетки – интенсификатора // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 3. С. 18 – 25.

3. Марков П.В., Солонин В.И., Цирин С.И. Модель конвективного и диффузионного обмена в пучке твэлов за интенсифицирующей решеткой // Наука и образование. Электронное научно-техническое издание. 2009. № 6.

4. Марков П.В. Интенсификация перемешивания в ТВС водо-водяных реакторов под давлением сотовыми перемешивающими решетками // Безопасность АЭС и подготовка кадров XII Международная конференция: Тезисы докладов. Обнинск, 2011. Т.1. С. 39.

5. Марков П.В. Моделирование гидродинамики и тепло- массообмена в ТВС нового поколения водо-водяных энергетических реакторов // Будущее машиностроения России: Сб. тр. Всерос. конф. Молодых ученых и специалистов. М., 2011. С. 198 – 199.

6. Марков П.В. Исследование течения в перемешивающих решетках ячеистого типа // Будущее машиностроения России: Сб. тр. Всерос. конф. Молодых ученых и специалистов. М., 2010. С. 180 – 181.