

# ТЕЧЕНИЕ И ТЕПЛОПЕРЕНОС В ПУЧКАХ СТЕРЖНЕВЫХ ТВЭЛОВ ВОДООХЛАЖДАЕМЫХ РЕАКТОРОВ С МОДИФИЦИРОВАННЫМИ СОТОВЫМИ ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИМИ РЕШЕТКАМИ

**В.Г. Крапивцев, П.В. Марков, В.И. Солонин**

*105005, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва*



Рассматривается течение и перенос тепла в потоках теплоносителей, охлаждающих пучки стержневых тепловыделяющих элементов ядерных реакторов (ТВЭлов), дистанционированных модифицированными сотовыми решетками. Решетки разработаны ОАО «Машиностроительный завод» (г. Электросталь) и отличаются от штатных наклоном упругих пуклевок, контактирующих с наружной поверхностью оболочек ТВЭлов. При течении теплоносителя в объеме таких ячеек в потоке возникают тангенциальные компоненты вектора скорости, ориентированные согласно направлению наклона пуклевок. Комплектуя поле решетки ячейками различной или одинаковой геометрии, можно создать различные вторичные течения в пучках стержней за решеткой. Рассмотрены решетки, создающие вторичные течения типа «закрутка вокруг ТВЭла» и «порядная прогонка». Исследование проводилось методами вычислительной гидродинамики с валидацией результатов расчетов по данным аэродинамических экспериментов. Описаны механизмы формирования вторичных течений за решетками, даны количественные оценки их интенсивности. Приведены данные о коэффициентах гидравлического сопротивления решеток при различных числах Рейнольдса как в условиях течения слабосжимаемого изотермического потока воздуха, так и при параметрах, характерных для теплоносителей первого контура реактора ВВЭР-1000. Выполнен анализ интенсификации перемешивания теплоносителя за решетками методом теплового следа при различных граничных условиях. Сделан вывод о возможности и эффективности применения модифицированных сотовых дистанционирующих решеток для выравнивания температурных неоднородностей в потоке теплоносителя за счет создания направленного конвективного переноса.

**Ключевые слова:** дистанционирующая решетка, активная зона, тепловыделяющий элемент, интенсификация перемешивания, вторичные течения, вычислительная гидродинамика.

## ВВЕДЕНИЕ

Повышение мощности водо-водяных ядерных реакторов невозможно без соблюдения требований к обеспечению их безопасной эксплуатации в условиях увеличен-

© В.Г. Крапивцев, П.В. Марков, В.И. Солонин, 2015

ной тепловой нагрузки на тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы) активной зоны. Высокие плотности тепловых потоков с поверхностей ТВЭЛов, гидравлическая неравноценность трактов течения теплоносителя в объеме активной зоны, обусловленная в том числе наличием местных гидравлических сопротивлений, могут привести к локальному перегреву теплоносителя, его поверхностному кипению, возникновению кризиса теплоотдачи, опасного с точки зрения деградации механических свойств материала оболочек ТВЭЛов с последующей разгерметизацией оболочек и выходом радиоактивных продуктов деления в контур циркуляции [1].

Исключение факторов, провоцирующих возникновение кризиса теплоотдачи в активных зонах водо-водяных реакторов при повышении мощности, можно организовать следующими способами:

- соблюдением соответствия между условиями охлаждения отдельных ТВЭЛов и величиной тепловыделения в них – физическим профилированием топлива;
- выравниванием полей скоростей и температур теплоносителя в потоке теплоносителя, что обеспечивает идентичные условия охлаждения ТВЭЛов в различных областях активной зоны.

Второй способ реализован в тепловыделяющих сборках зарубежных реакторов включением в состав дистанционирующих ТВЭЛы решеток специальных перемешивающих устройств в виде дефлекторов или лопаток [2, 3]. Работы по конструированию подобных устройств применительно к отечественным реакторам привели к созданию сотовых [4] и пластинчатых [5] перемешивающих решеток, устанавливаемых в ТВЭЛном пучке между штатными дистанционирующими решетками, при этом упругий контакт между оболочками ТВЭЛов и перемешивающими решетками отсутствует.

### **ОБЪЕКТ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ**

Рассматривается возможность интенсификации перемешивания в потоке теплоносителя путем установки в пучках ТВЭЛов модифицированных сотовых дистанционирующих решеток, разработанных ОАО «Машиностроительный завод» (г. Электросталь) [6, 7]. Модифицированные решетки отличаются от штатных тем, что упругие пуклевки на ячейках (сотах) решеток, контактирующие с оболочками ТВЭЛов, расположены не параллельно оси ТВЭЛА, как это сделано на штатных дистанционирующих решетках, а под углом к ней; выходное сечение ячеек повернуто относительно входного на угол  $60^\circ$ , что приводит к исключению сквозных проливных каналов в межъячеем пространстве решеток (рис. 1). Это технологически обоснованное решение интенсифицирует перемешивание потока за решетками не только за счет его турбулизации, но и за счет создания компонентов скорости в направлении, перпендикулярном основному течению теплоносителя (направленного конвективного переноса).

Поток теплоносителя внутри ячеек движется по параллельным каналам, образованным наружной поверхностью оболочек ТВЭЛов и внутренней поверхностью ячеек и разделенным друг от друга пуклевками. Таким образом, на выходе из ячеек модифицированной сотовой дистанционирующей решетки поток приобретает тангенциальные составляющие вектора скорости, ориентированные согласно направлению наклона пуклевки [7]. Комплектуя поле решетки ячейками с различными по направлению углами наклона можно организовывать определенные вторичные течения в ТВЭЛном пучке за решеткой. Длина ячеек, число и угол наклона пуклевки будут определять интенсивность закрутки теплоносителя в объеме отдельных ячеек и, следовательно, интенсивность вторичных течений [8].

Рассматриваются два варианта модифицированной сотовой дистанционирующей решетки:

- решетка, состоящая из ячеек с одинаковым углом наклона пуклевки (рис.

1а), организующая в потоке теплоносителя вторичное течение типа «закрутка вокруг твэла»;

– решетка с порядным чередованием ячеек, отличающихся направлением угла наклона пуклевок (рис. 1б), организующая в потоке теплоносителя вторичные течения типа «порядная прогонка».

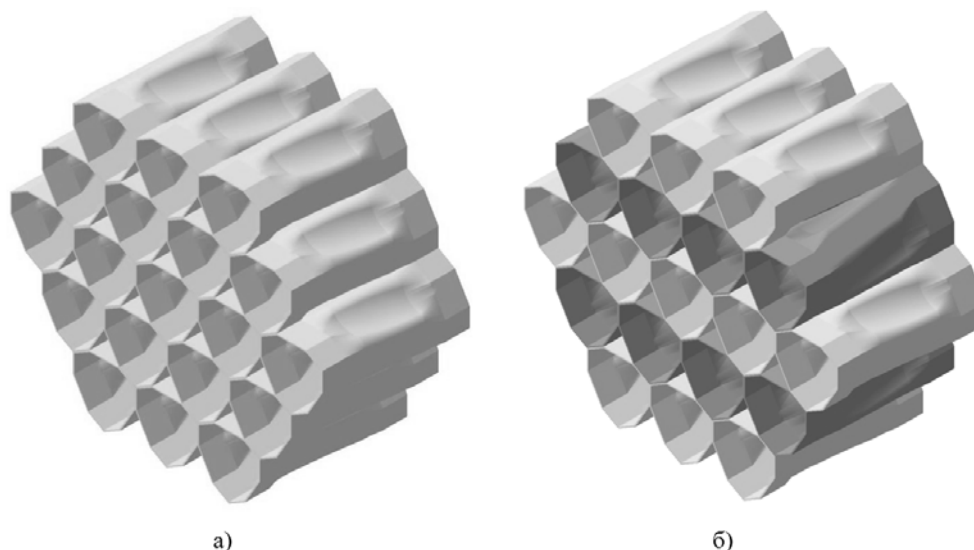


Рис. 1. Модифицированные сотовые дистанционирующие решетки конструкции ОАО «Машиностроительный завод»: а) решетка типа «закрутка вокруг твэла»; б) решетка типа «порядная прогонка»

Оба варианта решетки выполнены из ячеек высотой 30 мм с тремя пуклевками на боковой поверхности, ориентированными к оси ячейки под углом наклона  $+20^\circ$  (решетка типа «закрутка вокруг твэла») и  $\pm 20^\circ$  (решетка типа «порядная прогонка»). Анализируются 19-ячейстые фрагменты решеток без обода (см. рис. 1), установленные в 19-стержневой пучок. Пучок имеет длину 1 м и состоит из имитаторов твэлов ТВС ВВЭР-1000 диаметром 9,1 мм, расположенных в правильной треугольной упаковке с шагом 12,7 мм. Пучок с установленным в нем фрагментом исследуемой решетки заключен в шестигранный чехол внутренним размером «под ключ» 57,5 мм.

Исследование течения и теплопереноса в пучках выполнено методами вычислительной гидродинамики с использованием ПК STAR-CCM+ [9]. Математическая модель, используемая в расчете, базируется на осредненных уравнениях движения и энергии сплошной среды, замыкаемых нелинейной (квадратичной)  $k-\varepsilon$ -моделью турбулентной вязкости и моделью турбулентного числа Прандтля [8].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На выходе из ячеек решетки вокруг каждого стержня возникают закрученные вторичные потоки, ориентированные согласно направлению наклона пуклевок. Характерная величина касательной скорости в этих потоках составляет приблизительно 15 % от величины среднерасходной скорости потока в пучке. За решеткой без порядового чередования ячеек все потоки направлены против часовой стрелки (рис. 2а), что индуцирует образование в объеме треугольных субканалов между тремя соседними стержнями вихрей с противоположным (по часовой стрелке) направлением вращения. Кроме того, между периферийным рядом стержней и чехлом возникает кольцевое течение, направленное аналогично направлению закрутки потока

вокруг стержней; в условиях расчета – против часовой стрелки (рис. 2а).

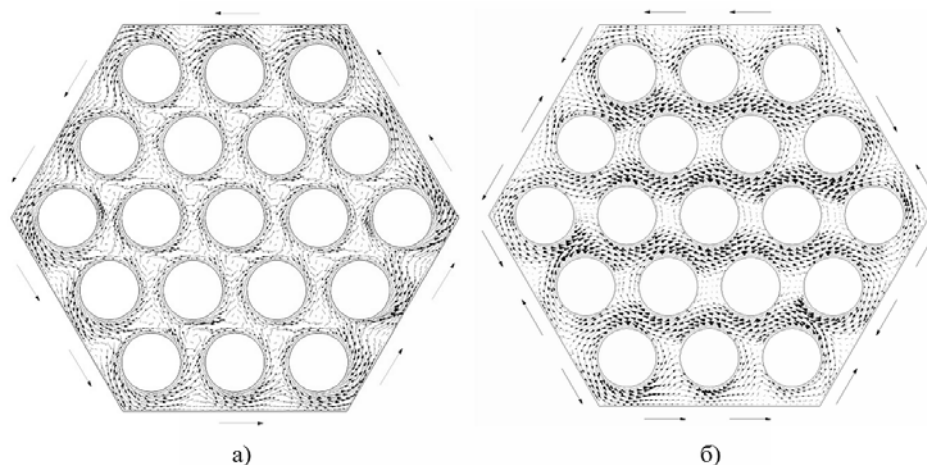


Рис. 2. Вторичные течения за модифицированной сотовой дистанционирующей решеткой: а) закрутка вокруг твэла; б) порядная прогонка

Закрученные вокруг стержней потоки, обеспечивающие межканальный обмен, за счет механизмов вязкого трения о поверхности стержней и взаимодействия друг с другом интенсивно затухают: при числе Рейнольдса  $4 \cdot 10^4$  они практически вырождаются на удалении 80 мм (8 гидравлических диаметров) за решеткой, при увеличении числа Рейнольдса до  $5 \cdot 10^5$  длина затухания составляет приблизительно 140 мм (14 гидравлических диаметров). Вихри, индуцированные в субканалах, затухают менее интенсивно; так на расстоянии 250 мм (25 гидравлических диаметров) от решетки величина поперечной скорости в них достигает 1 – 2 % от среднерасходной скорости. Причехловое кольцевое поперечное течение наиболее устойчиво: относительная поперечная скорость в этой области имеет значение 5 – 7 % на удалении 250 мм за решеткой.

За решеткой с порядным чередованием ячеек касательные компоненты скоростей между соседними рядами стержней оказываются сонаправленными. Это приводит к формированию разнонаправленных вторичных течений в рядах стержней на удалении за решеткой (рис. 2б). Интенсивность вторичных течений уменьшается с увеличением расстояния до решетки и незначительно увеличивается с ростом числа Рейнольдса в диапазоне его значений от  $1 \cdot 10^4$  до  $5 \cdot 10^5$ . Так характерное значение поперечной скорости между соседними рядами стержней, отнесенное к среднерасходной скорости в пучке, на расстоянии 100 мм (10 гидравлических диаметров) за решеткой составляет 10 – 12 %, на расстоянии 300 мм (30 гидравлических диаметров) за решеткой – 5 – 7 %. Вдоль стенок чехла, параллельных рядам ячеек решетки, формируются вторичные течения, ориентированные согласно направлению закрутки потока в причехловых ячейках. Вдоль остальных стенок в зазорах между соседними стержнями возникают чередующиеся между собой сходящиеся и расходящиеся вторичные потоки.

Коэффициент гидравлического сопротивления (КГС) решеток исследовался в диапазоне чисел Рейнольдса от  $4 \cdot 10^4$  до  $6 \cdot 10^4$  при течении в пучке потока воздуха, что соответствует условиям проведения аэродинамических экспериментов с физическими моделями модифицированных сотовых дистанционирующих решеток на кафедре «Ядерные реакторы и установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Результаты расчетных и экспериментальных исследований приведены в табл. 1. Немонотонность зависимости КГС решеток, имеющая экспериментальное подтверждение, связана с влиянием сжимаемости потока

воздуха при числах Рейнольдса  $\sim 6 \cdot 10^4$ , соответствующих числам Маха  $\sim 0,25$ . Как видно из таблицы, порядковое чередование слабо влияет на величину КГС, однако КГС решетки типа «порядная прогонка» несколько выше КГС решетки «закрутка вокруг твэла» при близких числах Рейнольдса. Расчетный прогноз дает значение КГС модифицированных решеток для чисел Рейнольдса, соответствующих условиям течения в активной зоне ВВЭР-1000 ( $Re \sim 5 \cdot 10^5$ ), равное приблизительно 0,5. Влияние обода решеток, исключая протечки между решетками и чехлом, на величину КГС в рамках настоящей работы не рассматривалось.

Таблица 1

**КГС модифицированных сотовых дистанционирующих решеток**

Решетка типа «закрутка вокруг твэла»			
Re	$6,29 \cdot 10^4$	$5,11 \cdot 10^4$	$3,94 \cdot 10^4$
Расчет	0,695	0,691	0,706
Эксперимент	0,715	0,673	0,718
Отклонение, %	-2,8	+2,7	-1,7
Решетка типа «порядная прогонка»			
Re	$6,37 \cdot 10^4$	$5,14 \cdot 10^4$	$4,05 \cdot 10^4$
Расчет	0,706	0,713	0,719
Эксперимент	0,725	0,704	0,757
Отклонение, %	-2,6	+1,3	-5,0

Влияние вторичных течений, генерируемых модифицированными сотовыми дистанционирующими решетками, на перемешивание теплоносителя в стержневых пучках анализировалось с использованием метода теплового следа: на входе в пучок задавалась температурная неоднородность, далее отслеживалась ее деформация за решетками. Рассматривалось два профиля входной температурной неоднородности. Первый профиль представлял собой центральное осесимметричное тепловое пятно радиусом, равным шагу расположения стержней (рис. 3а); таким образом, шесть центральных треугольных субканалов имели более высокую температуру, чем температура основного потока. Второй профиль – ступенчатый, при этом левая, относительно вертикальной плоскости симметрии, часть потока имела более высокую температуру (рис. 3б), правая – более низкую. Вертикальная плоскость симметрии перпендикулярна направлению вторичных течений за решеткой «порядная прогонка».

Результаты расчета приведены для сечений, отстоящих от выходного сечения решеток на удалении 300 мм. При осесимметричной температурной неоднородности за решеткой «закрутка вокруг твэла» максимум температуры локализован в центральной части пучка, при этом происходит размытие температурной метки до периферийного ряда стержней (рис. 4а). За решеткой с порядковым чередованием ячеек образуются два максимума температуры, смещенные в направлении вторичных течений от оси на расстояние, равное двум шагам расположения стержней (рис. 4б). Максимальная температурная неравномерность за решетками обоих типов уменьшается приблизительно на 30%.

При ступенчатой температурной неоднородности за решеткой без порядкового чередования ячеек в центральной части пучка имеет место размытие границы между горячим и холодными потоками при сохранении входных значений температуры потоков вне этой границы (рис. 5а). Ширина зоны смешения может быть оценена двумя шагами расположения стержней. В причехловой области за счет кольцевого поперечного течения, направленного против часовой стрелки, граница зоны смешения смещается относительно

вертикальной плоскости симметрии. За решеткой «порядная прогонка» происходит интенсивное перемешивание горячего и холодных потоков, глубина взаимного проникновения которых соответствует полуширине пучка (рис. 5б). Однако интенсивность массообмена в направлении, перпендикулярном вторичным течениям, невелика, что приводит к появлению областей между рядами стержней, температура в которых сохранила свое входное значение.

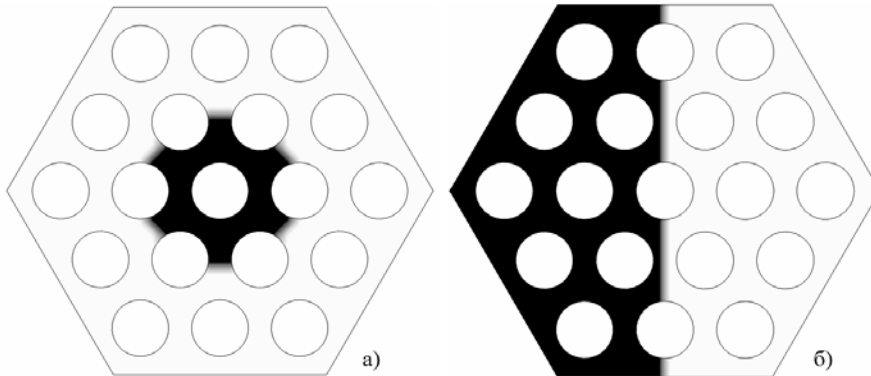


Рис. 3. Профили входной температурной неоднородности при исследовании перемешивания в пучках стержней с модифицированными сотовыми дистанционирующими решетками (темный цвет соответствует более высокой температуре): а) – осесимметричная температурная неоднородность; б) – ступенчатая температурная неоднородность

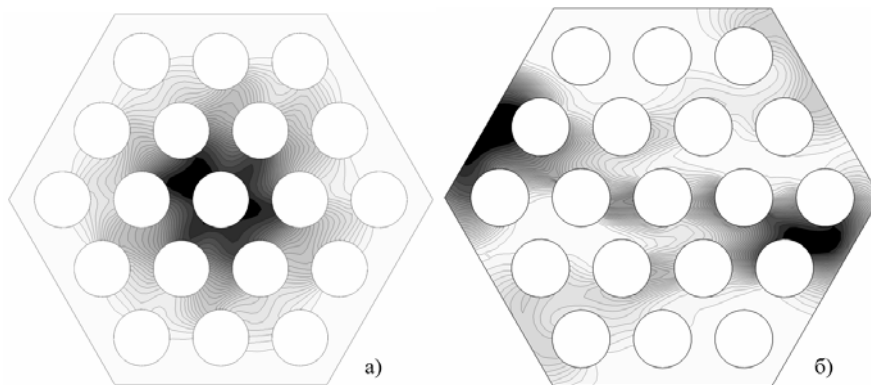


Рис. 4. Распределения температуры за модифицированными сотовыми дистанционирующими решетками при осесимметричной температурной неоднородности (темный цвет соответствует более высокой температуре): а) за решеткой «закрутка вокруг твэла»; б) за решеткой «порядная прогонка»

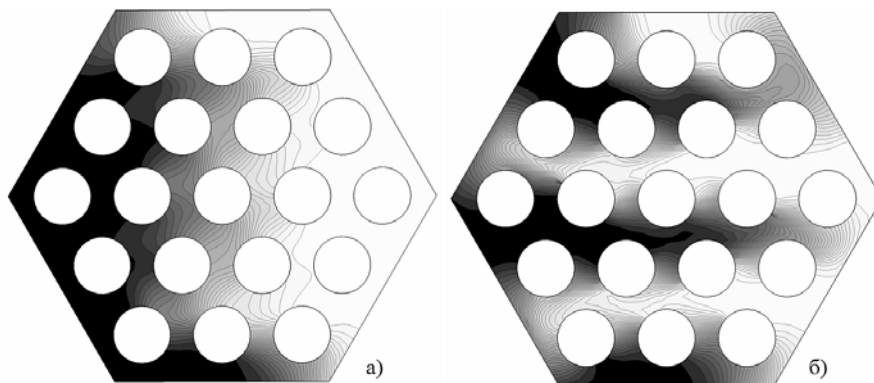


Рис. 5. Распределения температуры за модифицированными сотовыми дистанционирующими решетками при ступенчатой температурной неоднородности (темный цвет соответствует более высокой температуре): а) – за решеткой «закрутка вокруг твэла»; б) – за решеткой «порядная прогонка»

## ВЫВОДЫ

1. Выполнено численное исследование течения и переноса тепла в 19-стержневом пучке с модифицированными сотовыми дистанционирующими решетками конструкции ОАО «Машиностроительный завод», создающими вторичные течения типа «закрутка вокруг твэла» и «порядная прогонка». Расчеты проведены с использованием математической модели, базирующейся на осредненных уравнениях движения и энергии сплошной среды, замыкаемых нелинейной моделью турбулентной вязкости и моделью турбулентного числа Прандтля.

2. Показано, что порядное чередование ячеек решетки, имеющих наклонные к оси стержней пуклевки, приводит к возникновению в пучке за решеткой разнонаправленных вторичных потоков между рядами стержней. Закрутка потока вокруг стержней, индуцированная решеткой, поле которой состоит из идентичных ячеек, генерирует вихревые структуры в объемах отдельных субканалов и кольцевое поперечное течение высокой интенсивности между чехлом и периферийным рядом стержней.

3. Порядное чередование ячеек слабо влияет на величину КГС решеток, которое при  $Re \sim 5 \cdot 10^4$  составляет для исследуемых 19-ячеистых решеток приблизительно 0,7, а при  $Re \sim 5 \cdot 10^5$  – приблизительно 0,5. Выполнена валидация результатов расчета КГС по данным аэродинамических экспериментов.

4. Интенсификация перемешивания потока модифицированными сотовыми дистанционирующими решетками анализировалась методом теплового следа при формировании на входе осесимметричной и ступенчатой температурной неоднородностей. Осесимметричная температурная неоднородность эффективно уменьшается решетками обоих типов, однако при использовании решетки типа «порядная прогонка» происходит смещение максимума температуры в направлениях вторичных течений. При ступенчатой температурной неоднородности интенсивность перемешивания, оцененная по глубине взаимного проникновения горячего и холодного потоков, выше за решеткой типа «порядная прогонка», максимальная температурная неоднородность при этом локально сохраняет свое исходное значение за обеими решетками.

5. Высокая эффективность использования модифицированных сотовых дистанционирующих решеток для выравнивания температурных неоднородностей в потоке теплоносителя может быть обеспечена установкой в пучках решеток различных типов («порядная прогонка», «закрутка вокруг твэла») или созданием направленного конвективного переноса в различных направлениях за счет поворота последовательно установленных решеток типа «порядная прогонка» на угол 60 или 120 градусов относительно друг друга.

Авторы выражают благодарность коллективу ОАО «Машиностроительный завод» за техническое обеспечение экспериментальных работ на кафедре «Ядерные реакторы и установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана по исследованию характеристик модифицированных сотовых дистанционирующих решеток.

## Литература

1. Логвинов С.А., Безруков Ю.А., Драгунов Ю.Г. Экспериментальное обоснование теплогидравлической надежности реакторов ВВЭР. – М.: Академкнига, 2003. – 157 с.
2. Перепелица Н.И. Дистанционирующие решетки с локальными завихрителями для тепловыделяющих сборок PWR. // Атомная техника за рубежом. 2006, № 1. С. 3 – 7.
3. Перепелица Н.И. Дистанционирующие решетки со смесительными лопатками для тепловыделяющих сборок PWR. // Атомная техника за рубежом. 2006, № 2. С. 3 – 8.
4. Рыжов С.Б., Мохов В.А., Васильченко И.Н., Кобалев С.Н., Вьялицын В.В., Мальчевский

Д.В. Способ и устройство перемешивания теплоносителя в тепловыделяющих сборках ядерного реактора. / Пат. 2391725 РФ. Заявитель и патентообладатель ОАО «ОКБ Гидропресс». – № 2008138412/06; заявл. 29.09.2008; опубл. 10.06.2010.

5. Дмитриев С.М., Бородин С.С., Ершов А.Н., Легчанов М.А., Нырков Д.А., Солнцев Д.Н., Хробостов А.Е. Экспериментальные исследования эффективности перемешивания теплоносителя в обоснование выбора оптимальной конструкции ТВСА для внедрения в реакторы типа ВВЭР // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2009, № 1. С. 88 – 97.

6. Бабенко Ю.Н., Верещак В.Г., Иванов А.В., Одинцов Н.В., Петров И.В., Цирин С.И., Перепелица Н.И., Помятко Р.С., Солонин В.И. Структура решетки для тепловыделяющей сборки ядерного реактора. / Пат. 2389091 РФ. Заявитель и патентообладатель ОАО «Машиностроительный завод». – № 2008145619/06; заявл. 19.11.2008; опубл. 10.05.2010.

7. Крапивцев В.Г., Солонин В.И., Цирин С.И. Организация конвективного переноса в пучке твэлов за сотовыми решетками для водо-водяных энергетических реакторов. // Известия вузов. Машиностроение. 2011, № 4. С. 7 – 12.

8. Марков П.В. Интенсификация перемешивания в ТВС водоохлаждаемых реакторов сотовыми перемешивающими решетками. // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2012, № 1. С. 117 – 125.

9. STAR-CCM+, version 9.04. UserGuide (руководство пользователя), CD-adapco Group, 2014.

Поступила в редакцию 01.07.2015 г.

#### Авторы

Крапивцев Вениамин Григорьевич, доцент, канд. техн. наук  
E-mail: [en7@power.bmstu.ru](mailto:en7@power.bmstu.ru)

Марков Павел Владимирович, доцент, канд. техн. наук  
E-mail: [marrkov@mail.ru](mailto:marrkov@mail.ru)

Солонин Владимир Иванович, профессор, доктор техн. наук  
E-mail: [en7@power.bmstu.ru](mailto:en7@power.bmstu.ru)

UDC 621.039.517

## FLUID FLOW AND HEAT TRANSFER IN FUEL RODS ASSEMBLY WITH MODIFIED SPACER GRIDS

Krapivtsev V.G., Markov P.V., Solonin V.I.

Moscow Bauman State Technical University, 105005 Russia

### ABSTRACT

The paper considers the fluid flow and heat transfer in fuel rods assembly with modified spacer grids for light water nuclear reactors. Modified spacer grids are designed by «Mashinostroitel'nyj Zavod» (Electrostal', Russia). Cells of modified spacer grids rotate stream by corrugations, angled to the axis of cells. It's possible to generate different secondary flow down-stream the grids by compilation of grids by cells with different direction of rotation (clockwise or counterclockwise). Two types of modified spacer grids are considered: spacer grid of first type consist of similar cells and generate secondary flow like «rotation around rod»; spacer grid of second type consist of different cells and generate horizontal secondary flow between rows of rods. Investigation was performed by methods of computational fluid dynamics. Results of numerical simulations were validated with data of physical experiments. The mechanisms of secondary flows generation are described. The values of pressure drop coefficient of modified spacer grids are given. The influence of flow conditions (Reynolds number) on values of pressure drop coefficient is described. The analysis of the intensification of coolant's mixing by modified spacer grids with different boundary conditions is



described too. The conclusion about possibility of application modified spacer grids to decrease temperature non-uniformity in coolant flow due to generation of secondary flow had been done.

**Key words:** spacer grid, nuclear reactor core, fuel rod, intensification of coolant's mixing, secondary flows, computational fluid dynamics.

## REFERENCES

1. Eksperimental'noe obosnovanie teplogidravlicheskoj nadezhnosti reaktorov VVER (Experimental substantiation of thermal-hydraulic safety of VVER). Logvinov S.A., Bezrukov Yu.A., Dragunov Yu.G. Moscow. Akademkniga Publ., 2003, 157 p. (in Russian).
2. Perepelica N.I. Distancioniruyushhie reshgotki s lokal'nymi zavihritel'yami dlya teplovydelyayuschih sborok PWR (Spacer grid with local swirls for the PWR fuel assemblies). *Atomnaya tekhnika za rubezhom*, 2006, no. 1, pp. 3–7 (in Russian).
3. Perepelica N.I. Distancioniruyushchie reshgotki so smesitel'nymi lopatkami dlya teplovydelyayuschih sborok PWR (Spacer grid with mixing vanes for the PWR fuel assemblies). *Atomnaya tekhnika za rubezhom*, 2006, no. 2, pp. 3–8 (in Russian).
4. Sposob i ustrojstvo peremeshivaniya teplonosatelya v teplovydelyayuschih sborkah yadernogo reaktora (method and apparatus mixing a coolant in the fuel assembly of a nuclear reactor): patent 2391725 Rossijskaya Federaciya. Ryzhov S.B., Mohov V.A., Vasil'chenko I.N., Kobalev S.N., V'jalicy'n V.V., Mal'chevskij D.V. zayavitel' i patentoobladatel' OAO «OKB Hidropress». – №2008138412/06; zayavl. 29.09.2008; opubl. 10.06.2010 (in Russian).
5. Eksperimental'nye issledovaniya effektivnosti peremeshivaniya teplonosatelya v obosnovanie vybora optimal'noj konstrukcii TVSA dlya vnedreniya v reaktory tipa VVER (Experimental studies of the effectiveness of the coolant mixing in the rationale for the selection of optimal design TVSA for introduction into the reactors VVER). Dmitriev S.M., Borodin S.S., Ershov A.N., Legchanov M.A., Nyrkov D.A., Solncev D.N., Hrobostov A.E. *Izvestia vysshih uchebnyh zavedenij. Yadernaya energetika*, 2009, no. 1, pp. 88–97 (in Russian).
6. Struktura reshgotki dlya teplovydelyayuschej sborki yadernogo reaktora (Lattice structure for a fuel assembly of a nuclear reactor): patent 2389091 Rossijskaya Federaciya. Babenko Ju.N., Vereshhak V.G., Ivanov A.V., Odincov N.V., Petrov I.V., Cirin S.I., Perepelica N.I., Pomet'ko R.S., Solonin V.I. zayavitel' i patentoobladatel' OAO «Mashinostroitel'nyj zavod». – №2008145619/06; zayavl. 19.11.2008; opubl. 10.05.2010 (in Russian).
7. Organizaciya konvektivnogo perenosa v puchke tvelov za sotovymi reshgotkami dlya vodo-vodyanyh energeticheskikh reaktorov (Organization of convective transport in the fuel bundle for cell spacer grids for VVER). Krapivcev V.G., Solonin V.I., Cirin S.I. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie*, 2011, no. 4, pp. 7–12 (in Russian).
8. Intensifikacija peremeshivaniya v TVS vodoohlazhdaemyh reaktorov sotovymi peremeshivajushhimi reshetkami (Intensification of coolant's mixing in fuel assemblies of water cooled reactor by mixing grids) / Markov P.V. *Izvestia vysshih uchebnyh zavedenij. Yadernaya energetika*, 2012, no. 1, pp. 117–125 (in Russian).
9. STAR-CCM+, version 9.04. UserGuide, CD-adapco Group, 2014.

**Authors**

Krapivtsev Veniamin Grigor'evich, Assistant Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: en7@power.bmstu.ru

Markov Pavel Vladimirovich, Assistant Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: markov@list.ru

Solonin Vladimir Ivanovich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: en7@power.bmstu.ru