

УДК 621.039.524:536.24

Организация конвективного переноса в пучке ТВЭЛОВ за сотовыми решетками для водо-водяных энергетических реакторов

В.Г. Крапивцев, В.И. Солонин, С.И. Цирин

Проведен анализ конструкций дистанционирующих решеток типа водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР). Сформулированы задачи, решаемые при разработке новой конструкции перемешивающей решетки сотового типа. Представлен опытный образец перемешивающей решетки сотового типа для проведения исследований теплогидравлических характеристик. Описана методика и приведены результаты экспериментальных исследований опытных образцов перемешивающих решеток сотового типа. На основании проведенных исследований выбрана конструкция для перемешивающей решетки сотового типа, обеспечивающая высокую эффективность перемешивания.

Ключевые слова: турбулентность, ВВЭР, теплообмен, конвективный перенос, сборка стержней, температурное поле, сотовая перемешивающая решетка.

The spacer grids designs for VVER have been analyzed. The tasks to be solved when designing a new cell-type mixing grid have been formulated. A pilot sample of the cell-type mixing grid is presented to perform a thermohydraulic performance research. The research procedure has been described and the experimental investigation results of the cell-type mixing grid pilot samples have been provided. Based on the investigation results a basic design of the cell-type mixing grid providing high mixing efficiency has been chosen.

Keywords: turbulence, VVER, heat exchange, convective transfer, rod bundle, temperature field, cell-type mixing grid.

Тепловыделяющие сборки (ТВС) современных реакторов должны работать в условиях эксплуатационных нагрузок длительной кампании, большой мощности тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОВ), приближения средних параметров теплоносителя за активной зоной к параметрам насыщения [1]. В разрабатываемых ТВС не удастся устранить существенную неравномерность энерговыделения в ТВЭЛАХ, теплогидравлическую неравномерность трактов их охлаждения. Как следствие в наиболее напряженных участках ТВС имеет место локальное парообразование, снижается величина критического теплового потока, возникает опасность нарушения критериев теплотехнической надежности: в первую очередь возникновения кризиса теплоотдачи [1, 2]. Для повышения теплотехнической надежности активных зон повышенной тепловой мощности в настоящее время значительное



КРАПИВЦЕВ

Вениамин Григорьевич
кандидат технических наук, доцент кафедры «Ядерные реакторы и установки» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)



СОЛОНИН

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



ЦИРИН

Станислав Игоревич
ведущий инженер ОАО «Машиностроительный завод»

внимание уделяется разработке конструкций дистанционирующих и перемешивающих решеток для ТВС водоохлаждаемых реакторов.

Исследование влияния решеток на характер течения в пучках твэлов, критические тепловые потоки были начаты в 70—80-х гг. прошлого века применительно к реакторам с водой под давлением и кипящей водой. Было показано, что повышение критического теплового потока, тепловой мощности ТВС возможно при «усложнении» конструкции дистанционирующих решеток, которым наряду с функцией обеспечения проектного положения твэлов и других элементов ТВС предавались функции специального гидродинамического воздействия на поток теплоносителя [3]. Это воздействие направлено на повышение уровня турбулентной теплопроводности и вязкости потока, а так же создание поперечных составляющих скорости движения потока в пучке твэлов.

В отечественных водоохлаждаемых реакторах используется треугольное размещение твэлов в ТВС, комплектуемых активные зоны. Фрагмент поперечного сечения ТВС реактора ВВЭР-1000 приведен на рис. 1. Наружный диаметр твэла $d = 9,1$ мм, шаг решетки твэлов в ТВС $S = 12,75$ мм [1]. Твэлы в пучке удерживаются с заданным шагом дистанционирующими решетками сотового типа. Современные ячейки сотовых решеток имеют девятигранную форму с различными размерами граней. На больших гранях выполнены пуклевки-канавки, профиль и упругопластические свойства которых обеспечивают удержание твэла в ячейке, а форма ячеек и их взаимное расположение обеспечивают шаг расположения твэлов в пучке ТВС. Ячейки решетки разбивают поток теплоносителя между твэлами на систему параллельных потоков, движущихся как вдоль поверхности твэлов, так и в зазорах между ячейками решеток. Гидравлический диаметр потока в ячейке менее 3,5 мм, в пучке твэлов — 10,6 мм.

Форма ячеек традиционных дистанционирующих решеток симметрична оси пучка. Поэтому поверхности ячеек формируют поток теплоносителя на выходе из дистанционирующей решетки, имеющий направленную

практически вдоль оси пучка среднюю скорость и градиенты средней скорости существенно большие (в 3 и более раза), чем таковые при стабилизированном распределении скорости в пучке твэлов. Как следствие за решеткой возрастает генерация турбулентных пульсаций скорости и турбулентная диффузия массы, энтропии, количество движения через зазоры между твэлами увеличивается. Градиенты и пульсации скорости в потоке с увеличением расстояния от решетки уменьшаются и стремятся к их стабилизированным значениям. Длину участка стабилизации потока можно оценить при высоких числах Рейнольдса $\sim 5 \cdot 10^5$ значением 50 гидравлических диаметров каналов [4] (530 мм). Следовательно, на расстоянии порядка 500 мм влияние современных дистанционирующих решеток на турбулентное течение и турбулентный перенос в пучке твэлов будет исчезать.

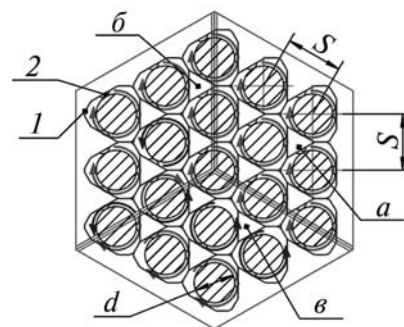


Рис. 1. Фрагмент поперечного сечения ТВС реактора:

1 — ячейки; 2 — пуклевки-канавки сотовой дистанционирующей решетки; а, б, в — варианты направления конвективных потоков за решеткой

Модернизация конструкции сотовой решетки с целью повышения коэффициентов межъядерного обмена возможна:

- при сохранении в потоке за решеткой преимущественно осевого направления течения, и повышенной генерации турбулентности ячейками решетки;
- при создании ячейками решетки поперечных составляющих скорости, интенсифицирующих турбулентную диффузию и конвективный поперечный обмен.

На рис. 1 представлены возможные варианты организации конвективных потоков за ре-

шеткой. В варианте *a* конвективные потоки, организованные ячейками, движутся через границы ячеек во встречных направлениях. Можно с уверенностью прогнозировать, что вариант *a* для организации конвективного переноса неэффективен, но способен интенсифицировать генерацию турбулентности и турбулентную диффузию за решеткой.

В варианте *b* конвективные потоки формируются ячейками решетки таким образом, что в шести ячейках, окружающих твэл, направления поперечных составляющих скорости через смежные границы шести ячеек одинаковы. Подобное исполнение решетки интенсифицирует поперечный конвективный перенос между шестью ячейками. Однако эти ячейки конвективно изолированы от других областей пучка периферийными границами, через которые возможен только турбулентный диффузионный перенос подобно таковому в варианте *a*.

В варианте *в* ячейки решетки, расположенные вдоль одного из трех основных направлений треугольной сетки пучка (вдоль ряда твэлов), создают одно направление поперечной скорости вокруг твэлов (против часовой стрелки), а в аналогично расположенных соседних рядах — противоположное направление поперечной скорости вокруг твэлов (по часовой стрелки). Для варианта *в* конвективный перенос в направлении рядов твэлов меняет знак от ряда к ряду и распространяется на все сечение пучка. Обмен между рядами диффузионный, подобно варианту *a*.

Согласно [4] обмен массой, теплотой, количеством движения между потоками, движущимися между тремя ближайшими друг к другу твэлами, через смежные зазоры ($S-d$) характеризуется коэффициентом межканального (межячейкового) обмена. Коэффициент межканального обмена массой равен отношению расхода перетечки из ячейки i в ячейку j на единице длины пучка G_{ij} к расходу текущему в ячейке i G_i ; $\mu_{\text{п}} = G_{ij}/G_i$. Аналогичный смысл имеют коэффициенты обмена теплотой и количеством движения. При $Re > 10^4$ для расчета турбулентного массообмена через один зазор рекомендуется [4] выражение

$$\mu_{\text{п}} \sim 0,01(s/d - 1)^{0,5} (Re/10^4)^{-0,2} d^{-1},$$

оценивающее значение $\mu_{\text{п}}$ величиной 0,5 и 0,3 1/м для чисел Рейнольдса $5 \cdot 10^4$ и $5 \cdot 10^5$ соответственно.

Плотное размещение твэлов в треугольной сетке позволяет отдать предпочтение способу формирования поперечной конвективной скорости за счет формы ячеек решетки: наклона канавок (пуклевок) к оси пучка, организации геометрии зазоров между ячейками решетки, способствующей созданию поперечной скорости.

Воздействия конструкции решетки на поток приводят, естественно, к увеличению их гидравлического сопротивления. Задачей разработки решеток является достижение высоких коэффициентов межячейкового обмена при приемлемом гидравлическом сопротивлении.

Во взаимодействии и при технической поддержке ОАО «МСЗ» в МГТУ им. Н.Э. Баумана проведены сравнительные испытания фрагментов сотовых перемешивающих решеток с различной конструкцией ячеек. По характеру гидродинамического воздействия на поток предложенные решетки классифицированы на три типа [5]:

1 тип обеспечивает за счет деформации ячеек вдоль образующих, параллельных оси пучка, а иногда и различной высоты ячеек, турбулизацию течения за решетками при сохранении осевого направления истекающего из ячеек потока;

2 тип обеспечивает за счет деформации ячеек пуклевками, оси которых расположены под углом к оси пучка, тангенциальное к поверхности твэлов вращение потока на выходе из ячеек в одном для всех ячеек направлении (см. рис. 1, *a*);

3 тип обеспечивает, как и второй, тангенциальное к поверхности твэлов вращение потока на выходе из ячеек, однако ячейки, расположенные в соседних рядах, имеют противоположные наклоны осей пуклевок (см. рис. 1, *в*). В результате между рядами ячеек решетки (рис. 2) возникают поперечные в пределах всей решетки потоки, имеющие противоположное направление (по линиям *A* — вправо, по линиям *B* — влево). Указанные движения потоков обеспечиваются как наклоном пукле-

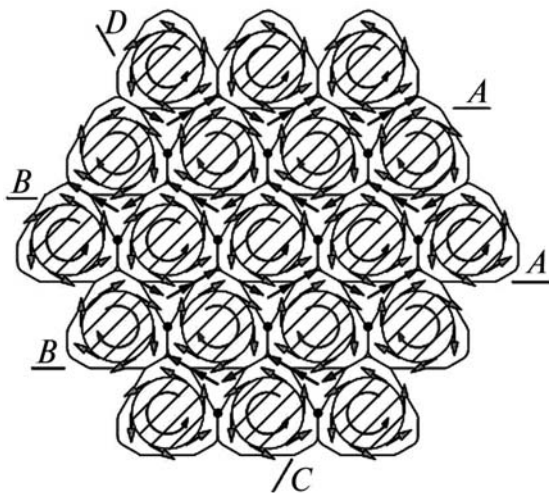


Рис. 2. Распределение поперечных потоков в выходном сечении перемешивающей решетки сотового типа с направленным конвективным переносом

вок-каналов, так и межъячейковыми каналами, образованными соединением ячеек. На границах ячеек, находящихся в одном ряду (помечены точками), направленный конвективный перенос демпфируется встречным движением потоков, в связи с чем поперечный обмен вдоль направлений C и D должен быть ниже, чем в направления A и B. Исследованный вариант конструктивного решения решетки с направленным поперечным переносом приведен на рис. 3.

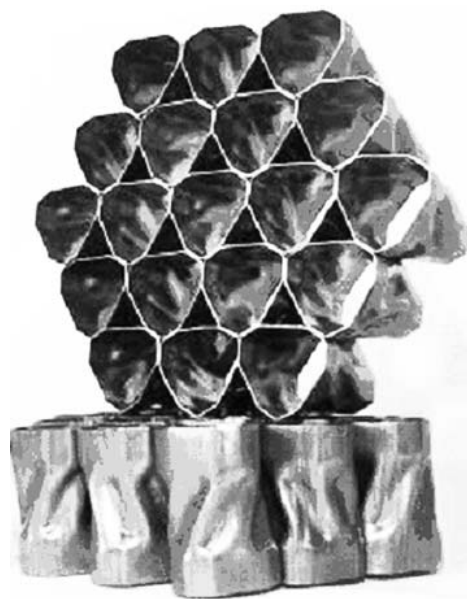


Рис. 3. Вариант конструктивного решения фрагмента сотовой решетки с направленным конвективным переносом

Коэффициенты перемешивания в потоке за различными решетками были получены на открытом аэродинамическом стенде в пучке из 19 твэльных трубок диаметром 9,1 мм с шагом треугольной решетки 12,75 мм, длиной 1 м, размещенных в шестигранном чехле, при продувке пучка потоком воздуха. Специальное коаксиальное входное устройство обеспечивало равномерное распределение скорости потока на входе в пучок и подогрев потока, поступающего в шесть центральных ячеек для теплоносителя на 25...50°С по сравнению с потоком, поступающим в периферийные ячейки пучка. На расстояниях z, равных 15; 230...250; 490...500 и 925 мм от входного сечения решетки зондом-щупом измерялись распределения температуры и скорости потока между рядами твэлов. Эксперименты выполнялись при числе Рейнольдса потока в пучке $Re = 4 \cdot 10^4$.

Измеренные распределения температуры потока вблизи решетки и на различных расстояниях за ней приведены на рис. 4 и 5. Распределения вида, представленного на рис. 4, для которых положения подогретой части потока в пучке оставалось в центральной области течения, характерны для всех решеток первого и второго типов. Решетка третьего типа принципиально иным образом организует поперечное смешение центрального подогретого и периферийного более холодного потоков, как это видно на рис. 5. Вместо одного максимума температуры на оси потока в сечении 15 мм, в сечении 250 мм возникают два максимума температуры у поверхности чехла. Наблюдаемая «аномалия» связана с тем, что конвективный поток вдоль линий A и B (см. рис. 2) приводит к транспортировке подогретого потока на периферию пучка, а холодного потока в центральную область течения.

Анализ экспериментальных данных показал, что величина коэффициента перемешивания, который определяется по соотношению

$$\mu_{\pi} = -\frac{0,5}{z} \ln \frac{T_{\pi} - T_{\pi}}{T_{\pi 0} - T_{\pi 0}}, \quad (1)$$

где z — расстояние до сечения измерения температуры T; в индексах приняты следующие обозначения: ц, п — центральные и перифе-

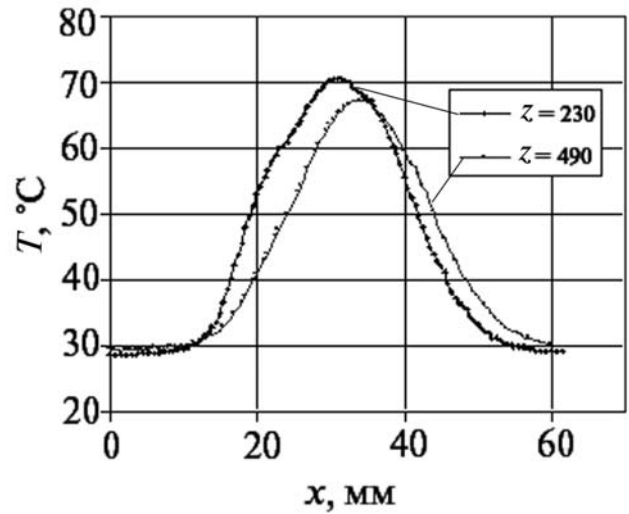
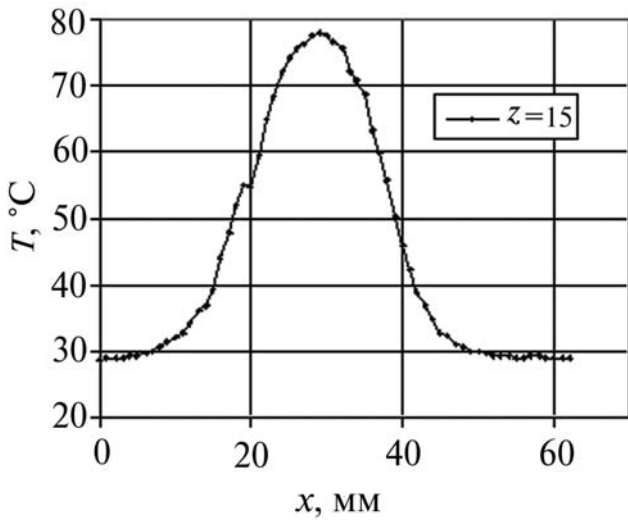


Рис. 4. Рассеяние температурной неоднородности за решеткой с диффузионным механизмом поперечного обмена на расстоянии z от выходного сечения решетки

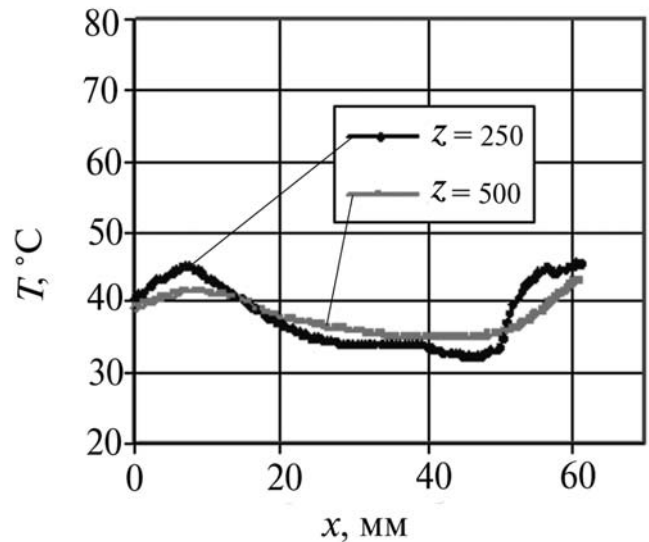
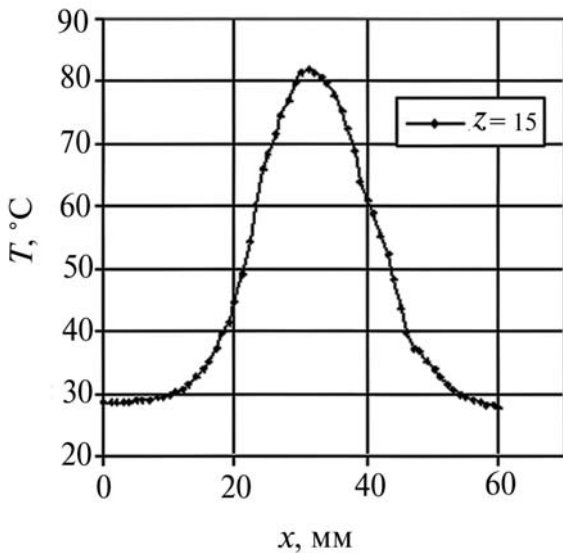


Рис. 5. Рассеяние температурной неоднородности за сотовой решеткой с направленным конвективным переносом на расстоянии z от выходного сечения решетки

рийные ячейки соответственно, o — сечение на выходе за решеткой. Для перемешивающих решеток первого и второго типов описываются общей зависимостью:

$$\frac{\mu_n(z)}{\mu_{cr}} = 1 + \frac{K_{\Delta p} \sqrt{K_{ГС}}}{\mu_{cr}} \exp(-K_z z),$$

где $\mu_n(z)$ — среднее значение коэффициента перемешивания на расстоянии z от решетки, $K_{\Delta p} = 1,8$, $K_z = 2,2$ 1/м. Приведенная зависимость обобщает экспериментальные данные со

среднеквадратичной погрешностью $\sim 8\%$. Для исследованных решеток коэффициент гидравлического сопротивления (КГС) составлял от 0,5 до 2,3 при $Re = 4 \cdot 10^4$. Максимальные значения коэффициента перемешивания достигали 3...4 1/м на расстоянии 250 мм. Коэффициент перемешивания за решетками $\mu_n(z)$ экспоненциально убывает, приближаясь к таковому в пучке твэлов μ_{cr} , который в условиях экспериментов был равен 0,39 1/м. Значения коэффициента перемешивания для этих решеток опреде-

лялись повышенным уровнем турбулентного обмена в потоке, пропорционального \sqrt{KGS} . Роль конвективного переноса незначительна.

Для решеток третьего типа определено отношение поперечной составляющей скорости конвективного переноса к среднерасходной скорости в пучке, которое в сечении $z = 250$ мм равно 0,1 вдоль ряда ячеек и 0,05 под углом 60° к ряду ячеек. Из определения $\mu_n(z)$ следует связь скорости поперечного переноса W_{ij} и среднерасходной скорости в ячейке:

$$W_{ij} 3(s-d) = W_i \left(s^2 \frac{\sqrt{3}}{4} - \frac{\pi d^2}{8} \right) \mu_n,$$

что для геометрии пучка ВВЭР, исследованной в экспериментах дает $\mu_n = 29$ 1/м для $W_{ij}/W_i = 0,1$.

Таким образом, сотовая решетка, создающая вращательное движение потока вокруг твэлов в противоположных направленных в соседних рядах ячеек, обеспечивает направленный конвективный перенос вдоль рядов ячеек. Это обуславливает на порядок более интенсивное перемешивание теплоносителя в пучках твэлов по сравнению с диффузионным турбулентным рассеянием тепловых неоднородностей в области потока, где сохраняется поперечная компонента скорости.

Полученные результаты являются основанием для продолжения исследований вариантов сотовых решеток с направленным конвективным переносом в целях оптимизации геометрии ячеек, характеристик обмена, выполнения экспериментов с электрообогревом пучка при натуральных параметрах теплоносителя.

Можно с уверенностью сказать, что сотовые решетки со встречным вращением потока в соседних рядах обеспечат высокий уровень направленного переноса и в условиях квадратной решетки твэлов, принятой для зарубежных реакторов аналогичного типа (PWR).

Литература

1. Шмелев В.Д., Драгунов, Денисов В.П., Васильченко И.Н. Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций. М.: ИКЦ «Академкнига» 2004. 220 с.
2. Логвинов С.А., Безруков Ю.А., Драгунов Ю.Г. Экспериментальное обоснование теплогидравлической надежности реакторов ВВЭР. М.: ИКЦ «Академкнига» 2004. 255 с.
3. Канальный ядерный энергетический реактор РБМК / Абрамов Н.А., Авдеев В.И., Адамов Е.О. и др. Под общей ред. Ю.М. Черкашова. М.: ГУП НИКИЭТ, 2006. 632 с.
4. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам: Ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы / Под общей ред. П.Л. Кириллова. М.: Энергоатомиздат, 1984. 296 с.
5. Солонин В.И. Решетки сотового типа для ВВЭР-1000 // Ежемесячный журнал атомной энергетики России, РОСЭНЕРГОАТОМ. № 8. Август 2008. С. 17–20.

Статья поступила в редакцию 03.03.2011 г.