

УДК 621.039

Изучение гидродинамических процессов течения теплоносителя в ТВС-Квадрат реактора PWR с различными перемешивающими дистанционирующими решетками*

С.М. Дмитриев, А.А. Добров, Д.В. Доронков, А.Н. Пронин, Д.Н. Солнцев, В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов

*Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород*

E-mail: nevid000@mail.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния различных вариантов конструкции перемешивающих дистанционирующих решеток на течение потока теплоносителя в ТВС–Квадрат реактора PWR. Исследования проводились путем моделирования течения теплоносителя в активной зоне на исследовательском воздушном стенде, который представляет собой аэродинамический разомкнутый контур. Для измерения локальных гидродинамических характеристик потока использовались специальные пневмометрические датчики, позволяющие измерять вектор скорости и значение скорости потока. При проведении исследований локальной гидродинамики теплоносителя измерялись поперечные скорости потока, а также расходы теплоносителя по ячейкам экспериментальной модели ТВС-Квадрат. Анализ пространственного распределения проекций абсолютной скорости потока позволил изучить и детализировать картину течения теплоносителя за перемешивающими дистанционирующими решетками с различными вариантами конструкции дефлекторов. Накопленная база данных по течению теплоносителя в ТВС-Квадрат является основой инженерного обоснования конструкций кассет активных зон реакторов PWR. Результаты экспериментальных исследований используются для верификации CFD-кодов как зарубежной, так и отечественной разработки, а также программ детального поэлементного расчета активных зон с целью уменьшения консерватизма при обосновании теплотехнической надежности реакторной установки.

Ключевые слова: гидродинамика теплоносителя, ядерный реактор, активная зона, тепловыделяющая сборка, перемешивающая дистанционирующая решетка.

Введение

В АО «ОКБМ Африкантов» разработана конкурентоспособная в сравнении с зарубежными аналогами по надежности, безопасности, экономичности и технологичности конструкция ТВС–Квадрат для активной зоны водо-водяных ядерных реакторов PWR (Pressurized water reactor). В частности, в ней использованы конструкторские решения, апробированные и рекомендовавшие себя в ТВС (тепловыделяющих сборках) для водо-водяных энергетических реакторов [1].

* Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания № 13.8823.2017/8.9, а также при финансовой поддержке гранта Президента РФ в рамках научного проекта МК-2398.2018.8.

Одним из таких решений является применение оригинальных перемешивающих дистанционирующих решеток (ПДР), предназначенных для интенсификации процессов тепло- и массопереноса в активной зоне реактора PWR. Особое внимание при этом следует уделять конструкции ПДР, а именно: геометрии и расположению дефлекторов, выбору угла их отгиба относительно осевого направления движения потока теплоносителя. Кроме этого, варианты исполнения перемешивающих решеток для ТВС-Квадрат требуют поиска оптимального конструктивного решения с точки зрения таких показателей, как эффективность перемешивания потока, гидравлические потери и запас до кризиса теплоотдачи.

Обоснование теплотехнической надежности активной зоны ядерного реактора во многом базируется на теплогидравлическом расчете, что, в свою очередь, требует большой информативности и высокой достоверности значений локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя [2]. Для решения этих вопросов необходимо проведение исследований условия течения теплоносителя и выявления закономерности формирования потока в характерных ячейках ТВС [3, 4], поэтому изучение распределения гидродинамических характеристик потока в ТВС-Квадрат за различными типами перемешивающих дистанционирующих решеток является актуальной задачей для обоснования теплотехнической надежности активной зоны реактора PWR.

Исследовательский стенд и методика измерений

Для изучения особенностей течения потока теплоносителя в ядерной энергетической установке в НГТУ им. Р.Е. Алексеева используется аэродинамический исследовательский стенд, представляющий собой разомкнутый контур, через который прокачивается воздух. В состав стенда входят: вентилятор высокого давления, ресиверная емкость, экспериментальная модель (ЭМ), расходомерное устройство, измерительный комплекс [5]. Принцип работы стенда заключается в том, что воздух посредством вентилятора высокого давления нагнетается в ресиверную емкость, далее проходит успокоительный участок, исследуемую экспериментальную модель и выбрасывается в атмосферу. Таким образом, на стенде моделируются гидродинамические условия течения потока теплоносителя [6].

Исследования локальной гидродинамики в ТВС-Квадрат реактора PWR проводились на 49-стержневой модели фрагмента ТВС-Квадрат, выполненной в полном подобии натурной ТВС-Квадрат с коэффициентом геометрического подобия $K_r = 4,2$. Модель имеет длину 3 м и состоит из квадратного чехла, сорока восьми цилиндрических твэл-имитаторов диаметром $d = 40$ мм, одного имитатора направляющего канала диаметром

$d=53$ мм и исследуемых поясов ПДР (рис. 1). Пояса ПДР состоят из взаимно перпендикулярных рядов пластин и восьмигранных ячеек, необходимых для дистанционирования твэлов. Верхние кромки пластин в местах их пересечения снабжены дефлекторами различного конструктивного исполнения. Рассматривались варианты дефлекторов четырех типов. Первый тип — «Прямой гиб» — первоначальный вариант дефлектора с углом отгиба 25° и параллельной линиейгиба относительно верхней кромки пластины;

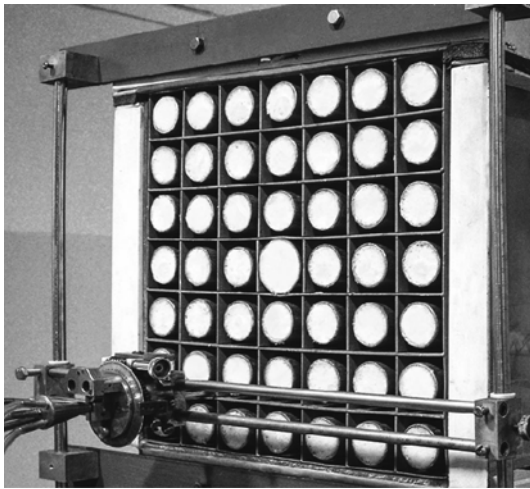


Рис. 1. Экспериментальная модель фрагмента ТВС-Квадрат.

второй — «Косой гиб» — усовершенствованный дефлектор типа «Прямой гиб» с увеличенной на 8 % площадью по отношению к первоначальному варианту и профилем, повернутым к центру ячейки согласно линиигиба в 15° относительно верхней кромки пластины; третий — «Обратный гиб» — усовершенствованный дефлектор типа «Прямой гиб» с увеличенной на 21 % площадью по отношению к первоначальному варианту и профилем, повернутым к твэлу согласно линиигиба в 15° относительно верхней кромки пластины; четвертый тип — «Увеличенной площади» — усовершенствованный дефлектор типа «Прямой гиб» с увеличенной на 28 % площадью по отношению к первоначальному варианту и профилем, повернутым к центру ячейки согласно линиигиба в 15° относительно верхней кромки пластины.

В состав измерительного комплекса входят: пятиканальный пневмометрический зонд, блок аналоговых преобразователей давления, координатное устройство, базовый блок коммутации/измерения, ЭВМ с соответствующим программным обеспечением. Измерение направления и величины скорости, а также давления в пространственном потоке осуществлялось пневмометрическим зондом, представляющим собой пять стальных капилляров диаметром 0,8 мм, расположенных в двух перпендикулярных друг к другу диаметральных плоскостях, срезанных под углом 30° . Чувствительная часть зонда имеет длину 20 мм. Остальная часть капилляров проложена внутри державки зонда, которая представляет собой стальную трубку диаметром 5 мм. Пневмометрический зонд сконструирован таким образом, что практически не вносит возмущения в поток и не искажает направление течения теплоносителя, так как поперечное сечение зонда не затесняет проходное сечение ячейки модели более чем на 5 %. Погрешность измерения проекций абсолютной скорости на оси x , y , z не превышает 7,5 % от абсолютной скорости. Снятие показаний с зонда осуществлялось с помощью блока аналоговых преобразователей давления. Диапазон измерений данных преобразователей составляет 0–4 кПа. Предел допускаемой основной погрешности данных приборов — $\pm 0,25\%$ [6].

Важным этапом проведения любого экспериментального исследования является подтверждение его представительности. В активной зоне реактора PWR число Рейнольдса соответствует $Re = 4,5 \cdot 10^5$, что труднодостижимо в лабораторных условиях. Однако поскольку течение воды высокого давления моделируется воздухом, то на основе теории гидродинамического подобия можно утверждать, что в области автомодельности профиль относительной скорости остается неизменным. Следовательно, полученные при изучении гидродинамики потока на моделях ТВС-Квадрат в зоне автомодельности результаты экспериментов могут быть перенесены на штатные условия течения теплоносителя в активной зоне реакторов PWR.

С целью нахождения нижней границы зоны автомодельности на стенде были выполнены исследования в диапазоне чисел $Re = 2 \cdot 10^4 \div 10^5$, которые заключались в построении эмпирической зависимости коэффициента сопротивления трения исследованного участка от числа Рейнольдса. Полученный массив точек аппроксимировался двумя линейными зависимостями — в переходной области турбулентного течения и в области автомодельного течения. Согласно полученным результатам область автомодельного течения в экспериментальной модели начинается с числа $Re = 7 \cdot 10^4$. Таким образом, для обоснования представительности исследований на стенде проведены эксперименты по определению участка нижней границы зоны автомодельного течения [7, 8].

Помимо вышперечисленных необходимым условием обоснования представительности исследований является равенство коэффициентов гидравлического сопротивления (КГС) штатных ПДР и ПДР рассматриваемой модели. Анализ результатов показал, что КГС перемешивающих дистанционирующих решеток экспериментальной модели в области автомодельного течения соответствуют КГС штатных перемешивающих дистанционирующих решеток. Результаты исследований КГС перемешивающих дистанционирующих решеток модели сведены в таблицу.

Таблица
Коэффициенты гидравлического сопротивления поясов ПДР ТВС-Квадрат

Тип решетки и дефлектора	КГС решетки
ПДР с дефлектором «Прямой гиб»	0,95
ПДР с дефлектором «Косой гиб»	1,01
ПДР с дефлектором «Обратный гиб»	1,03
ПДР с дефлектором «Увеличенной площади»	1,07

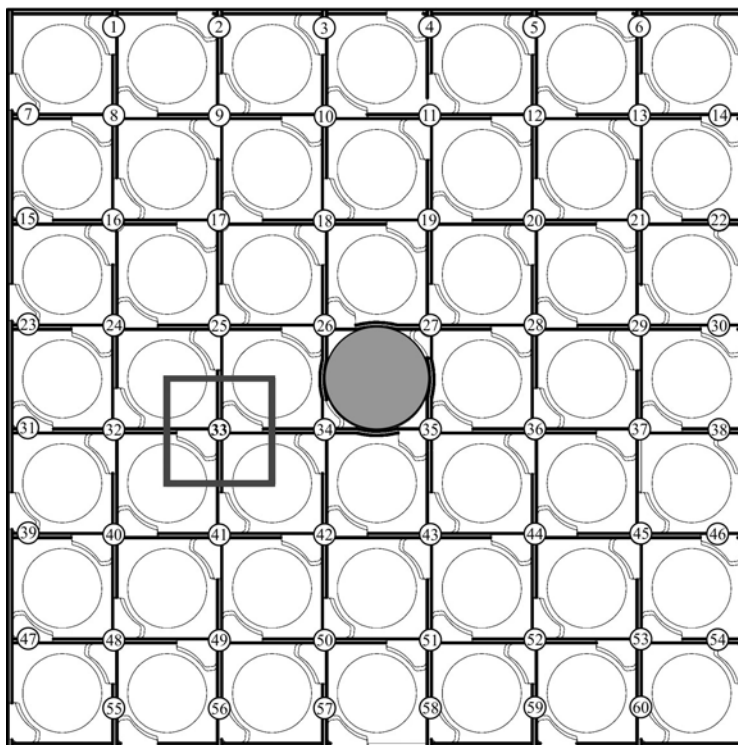


Рис. 2. Поперечное сечение модели.

Экспериментальные исследования локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя за ПДР заключались в измерении модуля и направления вектора скорости в исследуемой точке пучка стержней модели. Поперечное сечение модели разбивалось на 60 элементарных ячеек и в качестве характерной ячейки для определения влияния различных типов дефлекторов ПДР на течение потока теплоносителя была выбрана одна регулярная ячейка (рис. 2). Для получения полной пространственной картины течения теплоносителя за дефлекторами ПДР ячейки были разделены на зоны измерения (рис. 3), в каждой из которых вектор скорости определялся для 15 сечений по длине модели (рис. 4).

Результаты исследований гидродинамики теплоносителя в регулярных ячейках за перемешивающей дистанционирующей решеткой ТВС-Квадрат

По результатам экспериментальных исследований локальной гидродинамики потока за различными перемешивающими дистанционирующими решетками в регулярной ячейке выявлены следующие особенности течения теплоносителя в ТВС-Квадрат.

1. За любым из исследуемых типов дефлекторов ПДР возникают локальные вихри в пределах ячеек и направленные турбулентные течения между ячейками кассеты

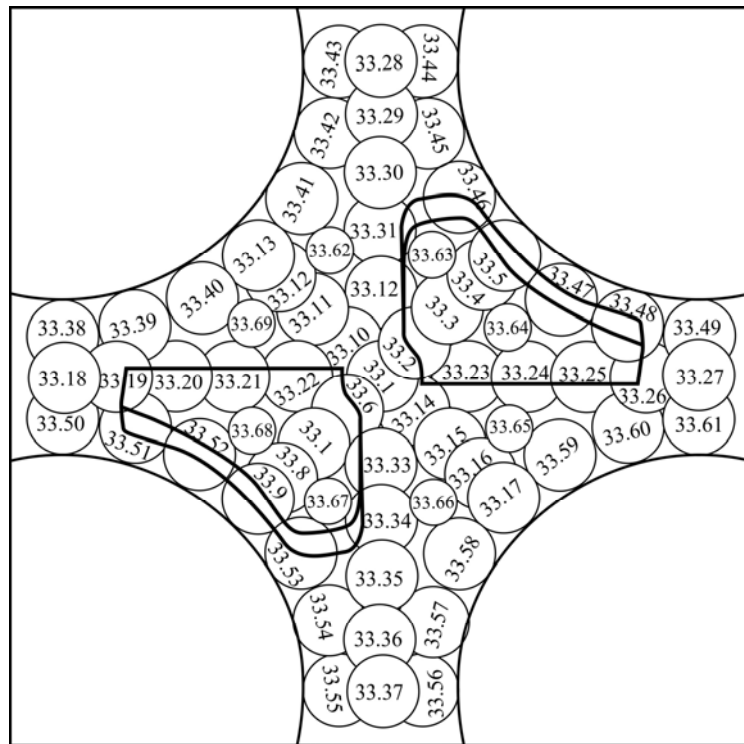


Рис. 3. Расположение зон измерения в исследуемой ячейке ТВС-Квадрат.

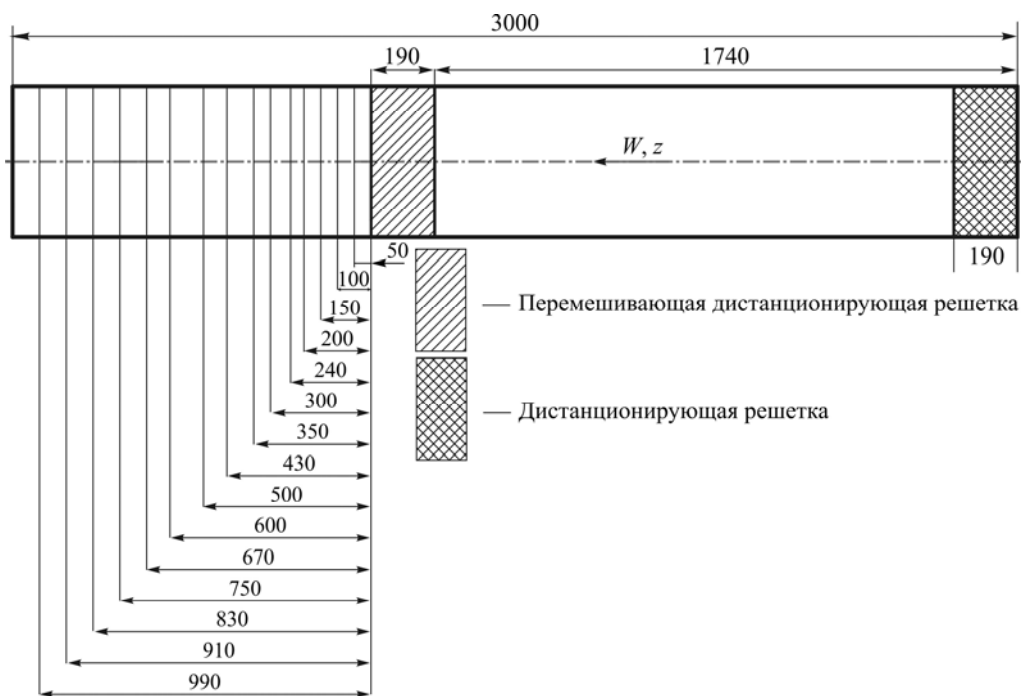


Рис. 4. Схема расположения сечений измерения гидродинамических характеристик по длине модели.

согласно ориентации дефлекторов (рис. 5). Форма вихревой структуры, образовавшейся за ПДР, зависит от угла линиигиба дефлектора относительно верхней кромки пластины ПДР. При угле линиигиба дефлектора, равном 0° (дефлектор типа «Прямой гиб»), образуются два вихря, расположенных около твэлов (рис. 5a), а при угле, равном 15° (дефлекторы типа «Косой гиб», «Обратный гиб» и «Увеличенной площади»), образуется один вихрь в центре ячейки (рис. 5b–5d).

2. Длина жизни вихря и интенсивность направленных турбулентных течений между соседними ячейками за различными дефлекторами ПДР при одинаковом угле их наклона относительно осевого направления движения теплоносителя зависят от профиля дефлекторов и площади перекрытия дефлекторами проходного сечения ячеек ТВС-Квадрат. По графикам, представленным на рис. 6, видно, что увеличение площади перекрытия дефлекторами проходного сечения ячеек ТВС-Квадрат приводит к уменьшению длины жизни вихря и росту интенсивности турбулентных течений между соседними ячейками.

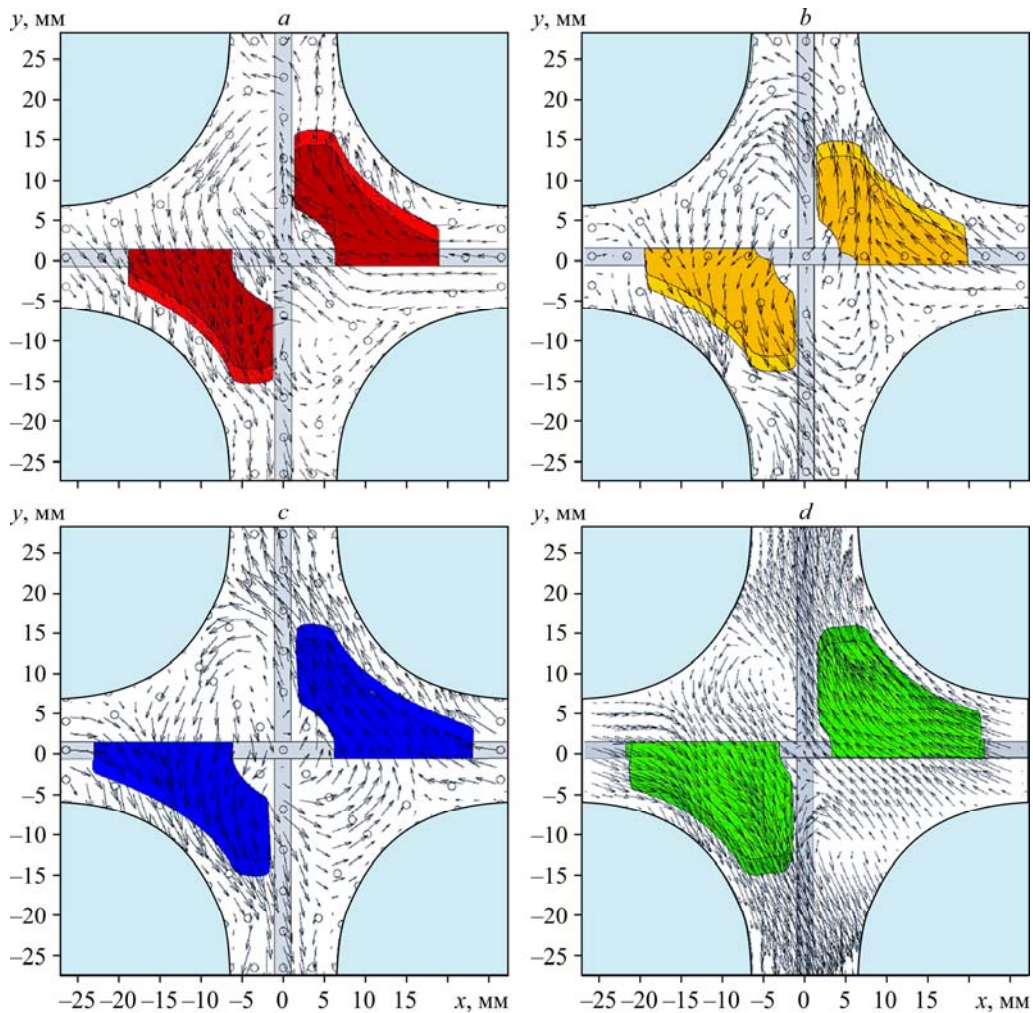


Рис. 5. Векторное поле в регулярной ячейке за исследуемыми дефлекторами ПДР-модели на расстоянии $l/d_r = 1,3$ от решетки.

Векторное поле за дефлекторами типа «Прямой гиб» (a), «Косой гиб» (b), «Обратный гиб» (c), «Увеличенной площади» (d).

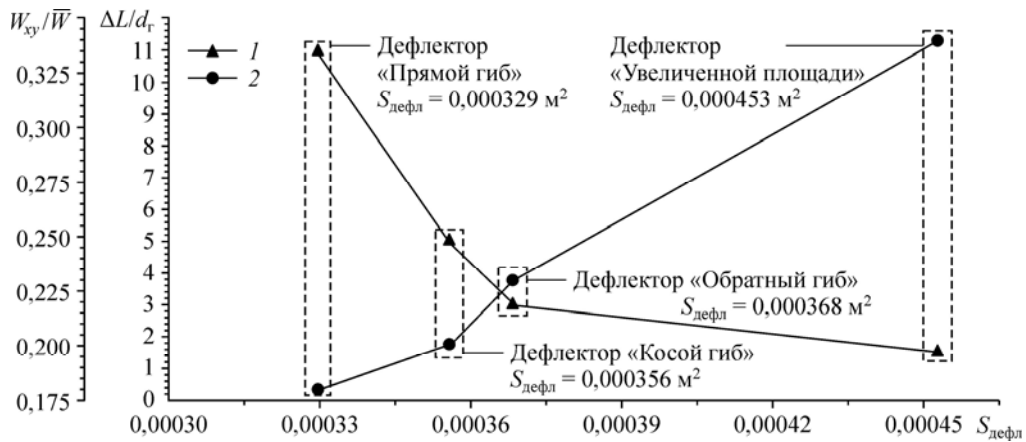


Рис. 6. Зависимость длины жизни вихревых структур и интенсивности турбулентных течений между соседними регулярными ячейками ТВС-Квадрат от площади дефлектора.

1 — длина жизни $\Delta L/d_r$ вихревой структуры, 2 — величина поперечной скорости W_{xy}/\bar{W} , осредненная по всем межъячейковым зазорам регулярной ячейки.

3. Затухание поперечных скоростей за ПДР с дефлекторами типа «Косой гиб» и «Прямой гиб» происходит на расстоянии $l/d_r \approx 15$ (d_r — гидравлический диаметр), а для ПДР с дефлекторами типа «Обратный гиб» — на расстоянии $l/d_r \approx 24$. За дефлекторами «Увеличенной площади» на расстоянии за ПДР $l/d_r = 25$ значения поперечной скорости $W_{xy}/\bar{W} = 0,16$. Этот факт говорит о том, что увеличение площади перекрытия дефлекторами проходного сечения ячеек приводит к росту длины затухания поперечных скоростей потока теплоносителя (рис. 7).

Оценка эффективности перемешивающей дистанционирующей решетки ТВС-Квадрат с различными типами дефлекторов

Для сравнения различных типов дефлекторов ПДР ТВС-Квадрат целесообразно использовать следующие параметры [9]:

— параметр межъячейкового обмена

$$F_{\text{mix}} = \frac{1}{S} \int \frac{|V_{\text{cross}}|}{U} dy, \quad (1)$$

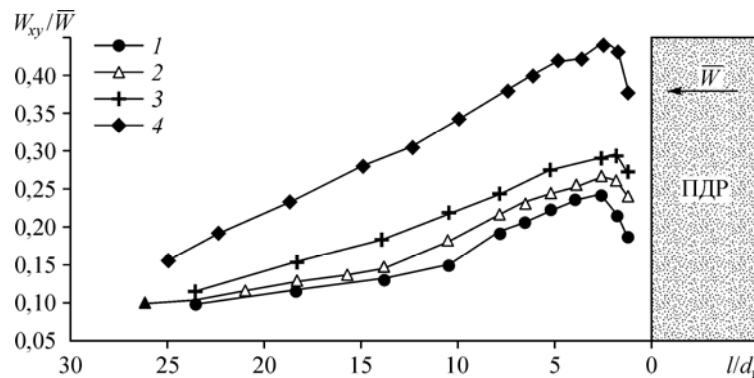


Рис. 7. Распределение относительной поперечной скорости W_{xy}/\bar{W}

в межъячейковых зазорах регулярной ячейки ТВС-Квадрат.

Дефлекторы типа «Прямой гиб» (1), «Косой гиб» (2), «Обратный гиб» (3), «Увеличенной площади» (4).

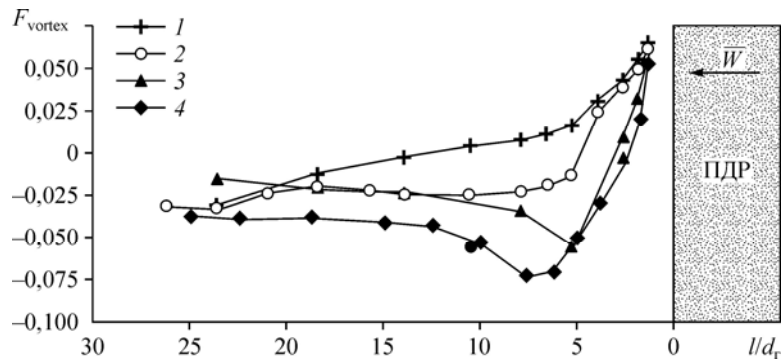


Рис. 8. Значения параметра завихренности потока F_{vortex} в регулярной ячейке ТВС-Квадрат. Дефлекторы типа «Прямой гиб» (1), «Косой гиб» (2), «Обратный гиб» (3), «Увеличенной площади» (4).

где S — зазор между твэлами, V_{cross} — компонента скорости теплоносителя через границу между ячейками, U — средняя скорость теплоносителя по сечению ячейки в направлении потока;

— параметр завихренности потока

$$F_{\text{vortex}} = \frac{\int r^2 V_{\text{lateral}} U_{\text{local}} dr}{R_S \int r U_{\text{local}}^2 dr}, \quad (2)$$

где V_{lateral} — тангенциальная составляющая скорости теплоносителя, U_{local} — локальная аксиальная компонента скорости теплоносителя, r — радиальное расстояние от центра до точки, в которой измеряются скорости теплоносителя, R_S — минимальное расстояние от центра ячейки до поверхности стержня.

По результатам расчета параметра завихренности потока F_{vortex} , определяющего интенсивность воздействия дефлекторов в регулярной ячейке модели, обнаружено, что при фиксированной координате l/d_r за любым из исследуемых дефлекторов данный параметр меняет знак (рис. 8), что свидетельствует об изменении направления движения поперечного потока теплоносителя. Для ПДР с дефлектором типа «Косой гиб» поток начинает движение в противоположную сторону при $l/d_r \approx 5$, для ПДР с дефлектором типа «Обратный гиб» и дефлектором «Увеличенной площади» — при $l/d_r \approx 3$, для ПДР

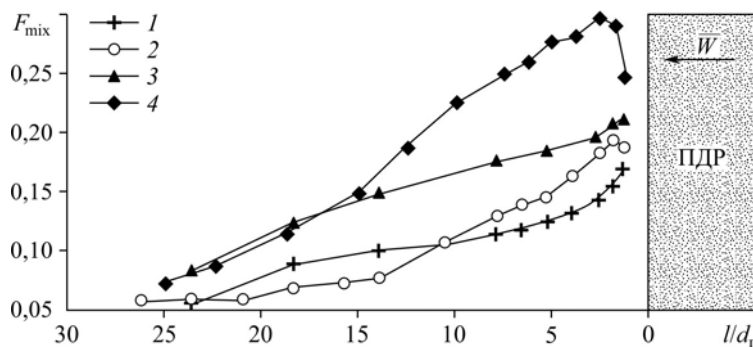


Рис. 9. Значения параметра межъячейкового обмена F_{mix} в регулярной ячейке ТВС-Квадрат. Обозначения см. на рис. 8.

с дефлектором типа «Прямой гиб» — при $l/d_T = 23$.

Расчеты параметра межъячейкового обмена между регулярными ячейками показали, что наибольшие значения параметра по всей длине за ПДР наблюдаются при установке на ПДР дефлекторов «Увеличенной площади» (рис. 9).

Заключение

На основе комплексного анализа результатов исследований локальной гидродинамики потока теплоносителя за ПДР ТВС–Квадрат с дефлекторами различных конструкций сделаны следующие выводы.

1. Форма вихревых структур, образовавшихся за любым из исследуемых типов дефлекторов ПДР, зависит от угла линиигиба дефлектора относительно верхней кромки пластины ПДР.

2. Длина жизни вихря и интенсивность направленных турбулентных течений между соседними ячейками за различными дефлекторами ПДР при одинаковом угле их наклона относительно осевого направления движения теплоносителя зависят от профиля дефлекторов и площади перекрытия дефлекторами проходного сечения ячеек ТВС–Квадрат.

3. Увеличение площади перекрытия дефлекторами проходного сечения регулярных ячеек приводит к росту длины затухания поперечных скоростей потока теплоносителя.

4. При фиксированной координате l/d_T за любым из исследуемых типов дефлекторов коэффициент, определяющий интенсивность воздействия дефлекторов, меняет знак, что свидетельствует об изменении направления движения поперечного потока теплоносителя.

5. Наибольшие значения параметра межъячейкового обмена по всей длине исследуемого участка наблюдается при установке на ПДР дефлекторов «Увеличенной площади».

Полученные результаты могут быть использованы в качестве базы данных для верификации CFD-кодов и программ детального поячеечного расчета активных зон водо-водяных ядерных реакторов с целью уменьшения консерватизма при обосновании теплотехнической надежности активных зон.

Список литературы

1. Дмитриев С.М., Бых О.А., Панов Ю.К., Сорокин Н.М., Зверев Д.Л., Фарафонов В.А. Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах. М.: Машиностроение, 2013. 415 с.
2. Дмитриев С.М., Баринев А.А., Самойлов О.Б., Хробостов А.Е. Методы обоснования теплотехнической надежности активной зоны тепловых водо-водяных реакторов // Атомная энергия. 2016. Т. 120, вып. 5. С. 270–275.
3. Волков С.Е., Кашинский О.Н., Курдюмов А.С., Лобанов П.Д., Прибатурин Н.А. Экспериментальное исследование влияния дистанционирующей решетки на структуру течения в ТВС реактора АЭС-2006 // Теплоэнергетика. 2013. № 1. С. 63–67.
4. Безруков Ю.А., Волков С.Е., Главный В.Г., Лисенков Е.А., Лобачев С.М., Прибатурин Н.А., Селезнев А.В. Исследование перемешивания теплоносителя в тепловыделяющей сборке реактора ВВЭР-1000 // Тяжелое машиностроение. 2012. № 9. С. 6–14.
5. Дмитриев С.М., Варенцов А.В., Добров А.А., Доронков Д.В., Самойлов О.Б., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е. Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в ТВС-Квадрат реакторов PWR с перемешивающими решетками // Теплоэнергетика. 2014. № 8. С. 20–27.
6. Дмитриев С.М., Бородин С.С., Легчанов М.А., Солнцев Д.Н., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е. Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР // Атомная энергия. 2012. Т. 113, вып. 5. С. 252–257.

Дмитриев С.М., Добров А.А., Доронков Д.В., Пронин А.Н., Солнцев Д.Н., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е.

7. **Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М.** Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов: теоретические основы и физика процесса. М.: Энергоатомиздат, 1989. 184 с.
8. **Гухман А.А.** Введение в теорию подобия. М.: Высшая школа, 1973. 296 с.
9. **Митрофанова О.В.** Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. М.: Физматлит, 2010. 290 с.

*Статья поступила в редакцию 18 февраля 2018 г.,
после доработки — 17 апреля 2018 г.*