

УДК 621.039

С.М. Дмитриев, Д.В. Доронков, М.А. Легчанов, В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов

**ОСОБЕННОСТИ КОНВЕКТИВНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ
ЗА ПЕРЕМЕШИВАЮЩИМИ ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИМИ РЕШЕТКАМИ
ТВС-КВАДРАТ РЕАКТОРА PWR**

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния перемешивающих дистанционирующих решеток с различными типами дефлекторов на течение теплоносителя в ТВС–Квадрат реактора PWR. Исследования проводились на аэродинамическом стенде с применением многоканального пневмометрического зонда. Анализ пространственного распределения проекций абсолютной скорости потока позволил детализировать картину течения теплоносителя за перемешивающей дистанционирующей решеткой с различными типами дефлекторов перемешивающих решеток. Полученные результаты работы используются для верификации трехмерных CFD-программ и в прикладных поячейковых кодах, а также являются базой данных при расчетах теплотехнической надежности активных зон реакторов PWR с ТВС-Квадрат.

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

В АО «ОКБМ Африкантов» разработана конструкция ТВС–КВАДРАТ для активной зоны реакторов PWR, конкурентоспособная с зарубежными аналогами по надежности, безопасности, экономичности и технологичности. В частности, в ТВС-КВАДРАТ использованы апробированные и зарекомендовавшие себя в ТВС для реакторов ВВЭР конструкторские решения [1].

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 следует уделить конструкции ПДР: геометрии и расположению дефлекторов, а также выбору угла отгиба их относительно осевого направления движения потока теплоносителя. Следовательно, 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 обязывает к большой информативности и высокой достоверности значений локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя [2]. Для решения данной научно-технической задачи необходимо исследовать условия течения теплоносителя и выявить закономерности формирования потока в характерных ячейках ТВС. Поэтому исследования распределения гидродинамических характеристик потока в характерных областях ТВС-КВАДРАТ за различными типами перемешивающих дистанционирующих решеток является актуальной задачей, решение которой необходимо при обосновании теплотехническую надежность активной зоны реактора PWR.

Экспериментальный стенд

Для изучения особенностей течения потока теплоносителя в ЯЭУ в НГТУ им. П. Е. Алексеева функционирует аэродинамический экспериментальный 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 [3].

Принцип работы стенда заключается в том, что воздух посредством вентилятора высокого давления нагнетается в ресиверную емкость, далее проходит успокоительный участок, ЭМ и выбрасывается в атмосферу. Таким образом, на стенде моделируются гидродинамические условия течения потока теплоносителя.

Исследования локальной гидродинамики в ТВС-Квадрат реактора РWR проводились на 49-стержневой модели фрагмента ТВС-КВАДРАТ, выполненной в полном подобии натурной ТВС-КВАДРАТ с коэффициентом геометрического подобия $K_g=4,2$. Модель имеет длину 3 м и состоит из квадратного чехла, цилиндрических твэл-имитаторов с описанным диаметром $d=40$ мм и исследуемых поясов ПДР.

Пояса ПДР состоят из взаимно перпендикулярных рядов пластин и восьмигранных ячеек, выполняющих функцию дистанционирования твэлов. Верхние кромки пластин в местах их пересечения снабжены дефлекторами различного конструктивного исполнения. Рассматривались четыре варианта дефлекторов:

1) дефлектор типа «прямой гиб» (рис. 1, а). Первоначальный вариант дефлектора с углом отгиба 25° и параллельной линиейгиба относительно верхней кромки пластины;

2) дефлектор типа «косой гиб» (рис. 1, б). Усовершенствованный дефлектор типа «прямой гиб» увеличенной площадью на 8% по отношению к первоначальному варианту и профилем, повернутым к центру ячейки согласно линиигиба в 15° относительно верхней кромки пластины;

3) дефлектор типа «обратный гиб» (рис. 1, в). Усовершенствованный дефлектор типа «прямой гиб» увеличенной площадью на 21% по отношению к первоначальному варианту и профилем, повернутым к твэлу согласно линиигиба в 15° относительно верхней кромки пластины;

4) дефлектор «увеличенной площади» (рис. 1, г). Усовершенствованный дефлектор типа «прямой гиб» увеличенной площадью на 28% по отношению к первоначальному варианту и профилем, повернутым к центру ячейки согласно линиигиба в 15° относительно верхней кромки пластины.

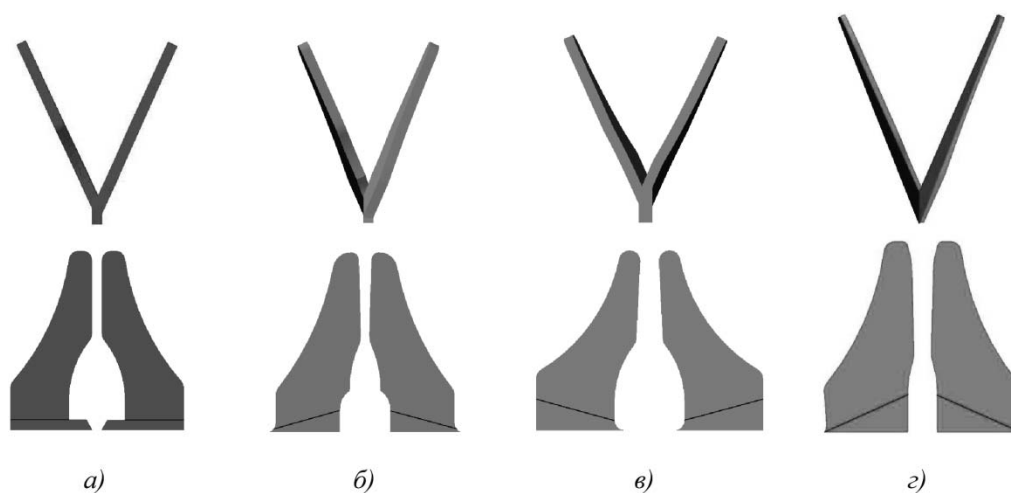


Рис. 1. Исследуемые типы дефлекторов на ПДР ТВС-КВАДРАТ:

а – дефлектор типа «прямой гиб»; б – дефлектор типа «косой гиб»;
в – дефлектор типа «обратный гиб»; г – дефлектор «увеличенной площади»

Измерительный комплекс

В состав измерительного комплекса входят пятиканальный пневмометрический зонд, блок аналоговых преобразователей давления, координатное устройство, базовый блок коммутации/измерения, ЭВМ с соответствующим программным обеспечением [4].

Измерение направления и величины скорости, а также давления в пространственном потоке осуществлялось пневмометрическим зондом, представляющий собой пять стальных

капилляров, расположенных в двух перпендикулярных друг к другу диаметральных плоскостях, срезанные под углом 30° . Пневмометрический зонд сконструирован таким образом, что он практически не вносит возмущения в поток и не искажает направление течения теплоносителя. Это условие обеспечивается за счет того, что поперечное сечение зонда не затесняет проходное сечение ячейки ЭМ более чем 5%. Предельные отклонения проекций абсолютной скорости на оси X , Y , Z не превышают 7,5% от абсолютной скорости. Снятие показаний с зонда осуществлялось с помощью блока аналоговых преобразователей давления. Предел допускаемой основной погрешности данных приборов составляет $\pm 0,25\%$.

Обоснование представительности экспериментальных исследований

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. Но поскольку течение воды высокого давления моделируется воздухом, то на основе теории гидродинамического подобия можно утверждать, что в области автомодельности профиль относительной скорости остается неизменным. Поэтому при изучении гидродинамики потока на моделях ТВС-КВАДРАТ в зоне автомодельности полученные результаты экспериментов могут быть перенесены на штатные условия течения теплоносителя в активной зоне реакторов PWR. Таким образом, для обоснования представительности исследований на стенде проведены эксперименты по определению участка нижней границы зоны автомодельного течения [5, 6].

С целью нахождения нижней границе зоны автомодельности на стенде проведены исследования в диапазоне чисел $Re = 2 \cdot 10^4 \div 1 \cdot 10^5$, 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. Точка пересечения этих прямых является нижней границей области автомодельного течения по числу Рейнольдса. Согласно полученным результатам область автомодельного течения в ЭМ начинается с чисел $Re = 7 \cdot 10^4$.

Также необходимым условием обоснования представительности исследований является равенство коэффициентов гидравлического сопротивления (КГС) штатных ПДР и ПДР 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 табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты гидравлического сопротивления поясов ПДР ТВС-КВАДРАТ

| Тип решетки и дефлектора | КГС решетки |
|-----------------------------------------|-------------|
| ПДР с дефлектором типа «прямой гиб» | 0,95 |
| ПДР с дефлектором типа «косой гиб» | 1,01 |
| ПДР с дефлектором типа «обратный гиб» | 1,03 |
| ПДР с дефлектором «увеличенной площади» | 1,07 |

Методика проведения исследований

Экспериментальные исследования локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя за ПДР заключались в измерении модуля и направления вектора скорости в исследуемой точке пучка стержней модели. В качестве характерных ячеек 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, в каждой из которых вектор скорости определялся для 11 сечений по длине модели.

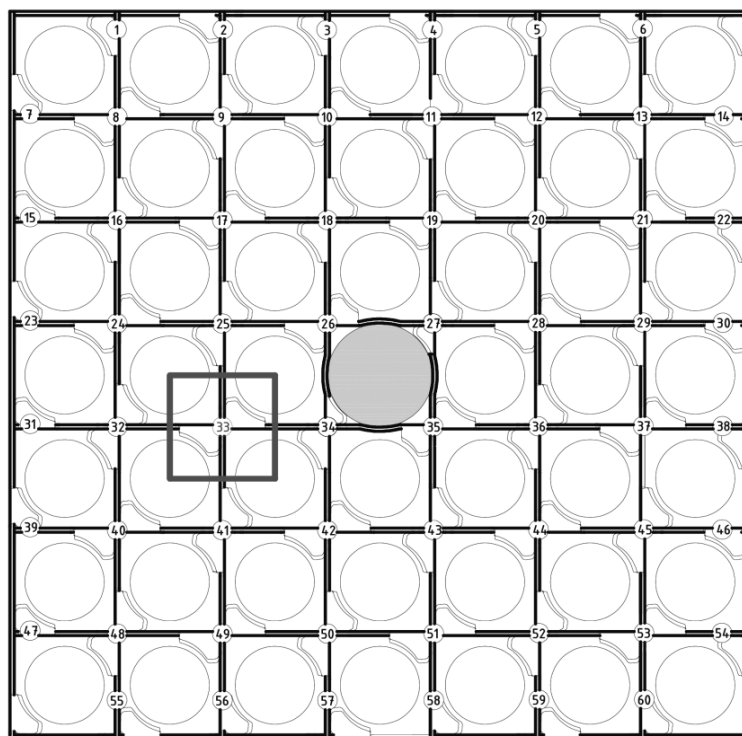


Рис. 2. Поперечное сечение ЭМ

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 согласно ориентации дефлекторов (рис. 3).

2. Форма вихревой структуры, образовавшейся за ПДР, зависит от угла линиигиба дефлектора относительно верхней кромки пластины ПДР. При угле линиигиба дефлектора равной 0° (дефлектор типа «прямой гиб») образуются два вихря, расположенных около твэлов (рис. 3 а), а при угле равном 15° (дефлектора типа «косой гиб», «обратный гиб» и «увеличенной площади») образуется один вихрь в центре ячейки (рис. 3 б, в, г).

3. 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 зависит от профиля дефлекторов и площади перекрытия дефлекторами проходного сечения ячеек ТВС-КВАДРАТ. По графикам, представленным на рис. 4, 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.

4. Затухание поперечных скоростей за ПДР с дефлекторами типа «косой гиб» и «прямой гиб» происходит на расстоянии $l/d_2 \approx 15$, для ПДР с дефлекторами типа «обратный гиб» на расстоянии $l/d_2 \approx 24$. За дефлекторами «Увеличенной площади» на расстоянии за ПДР $l/d_2 = 25$ значения поперечной скорости $W_{xy}/W = 0,16$. Данный факт свидетельствует о том, что увеличение площади перекрытия дефлекторами проходного сечения ячеек приводит к росту длины затухания поперечных скоростей потока теплоносителя (рис. 5).

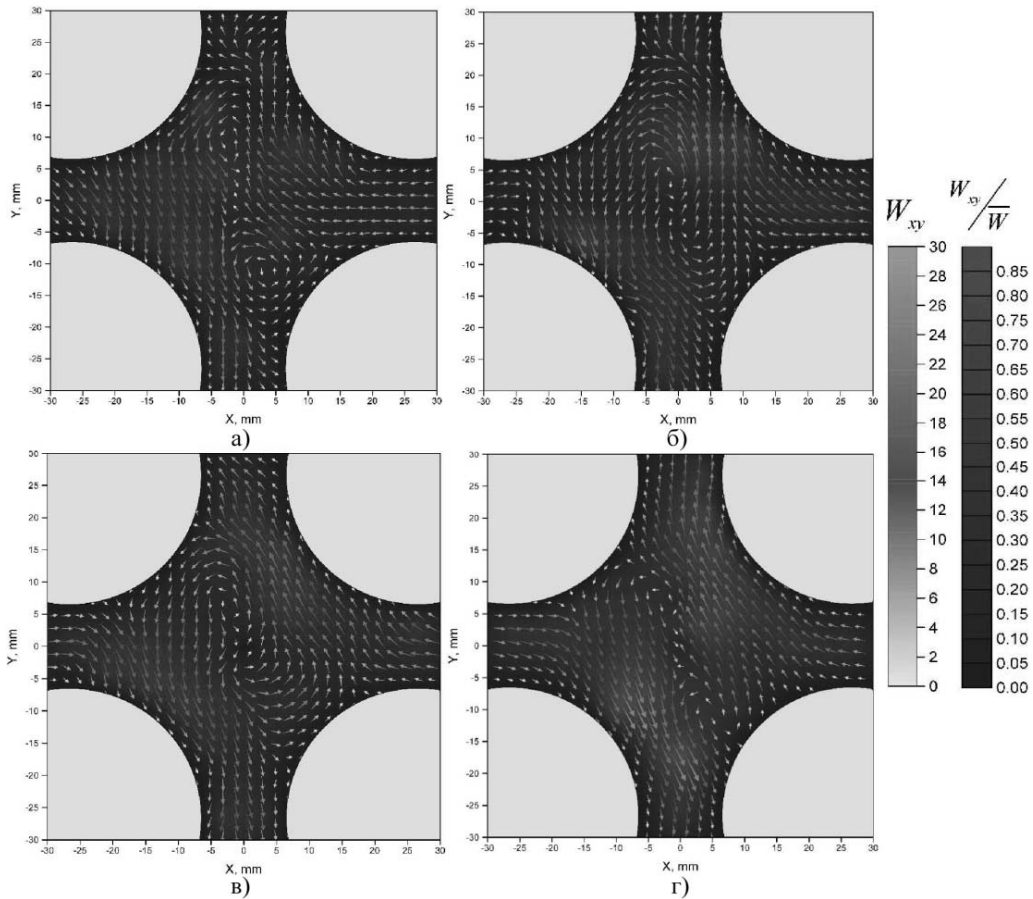


Рис. 3. Векторное поле в регулярной ячейке за исследуемыми дефлекторами ПДР модели на расстоянии $l/d_z=1,3$ от решетки:

a – векторное поле за дефлекторами типа «прямой гиб»; *б* – векторное поле за дефлекторами типа «косой гиб»; *в* – векторное поле за дефлекторами типа «обратный гиб»; *г* – векторное поле за дефлекторами «увеличенной площади»



Рис. 4. Зависимость длины жизни вихревых структур и интенсивности турбулентных течений между соседними регулярными ячейками ТВС-КВАДРАТ от площади дефлектора

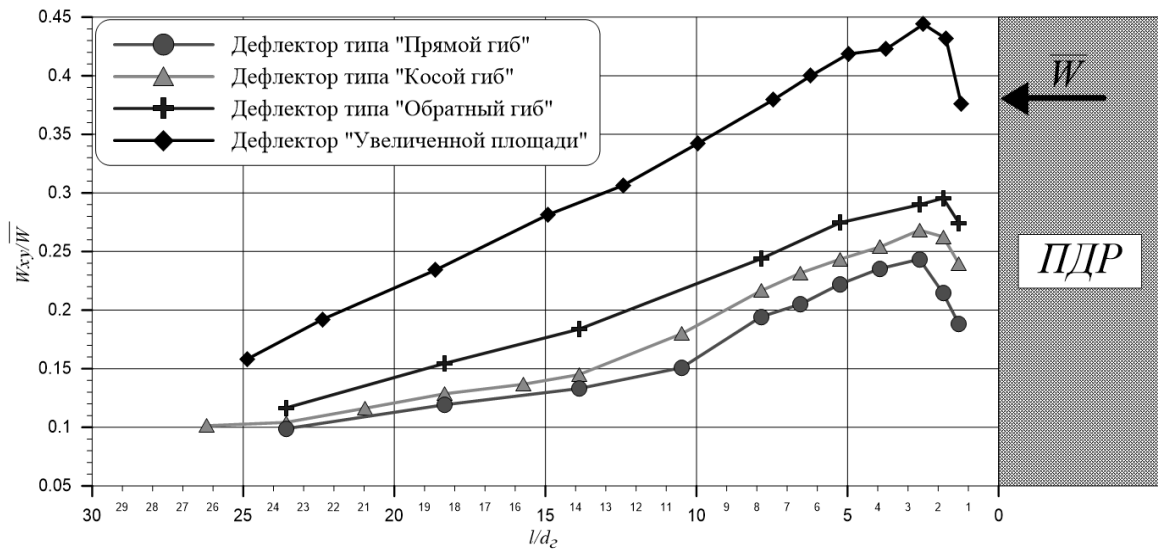


Рис. 5. Распределение относительной поперечной скорости W_{xy}/W в межтвэльных зазорах регулярной ячейки ТВС-КВАДРАТ

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

Для сравнения различных типов дефлекторов ПДР ТВС-КВАДРАТ целесообразно использовать следующие параметры [7]:

1. Параметр межъячейкового обмена F_{mix} :

$$F_{mix} = \frac{1}{S} \int \frac{|V_{cross}|}{U} dy, \tag{1}$$

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

2. Параметр завихренности потока: F_{vortex}

$$F_{vortex} = \frac{\int r^2 V_{lateral} U_{local} dr}{R_s \int r U_{local}^2 dr}, \tag{2}$$

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, определено, что при фиксированной координате l/d_2 за любым из исследуемых дефлекторов данный коэффициент меняет знак (рис. 6), что свидетельствует об изменении направления движения поперечного потока теплоносителя. Для ПДР с дефлектором типа «косой гиб» поток начинает движение в противоположную сторону при $l/d_2 \approx 5$, для ПДР с дефлектором типа «обратный гиб» и дефлектором «увеличенной площади» при $l/d_2 \approx 3$, для ПДР с дефлектором типа «прямой гиб» при $l/d_2 = 23$.

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. 7).

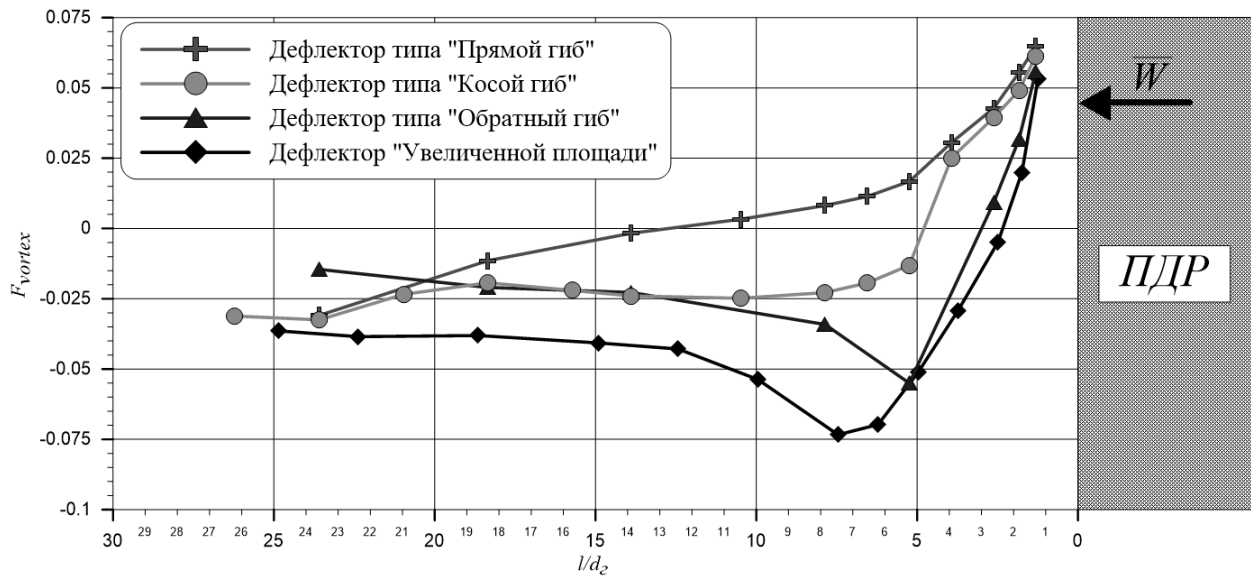


Рис. 6. Значения параметра завихренности потока F_{vortex} в регулярной ячейке ТВС-КВАДРАТ

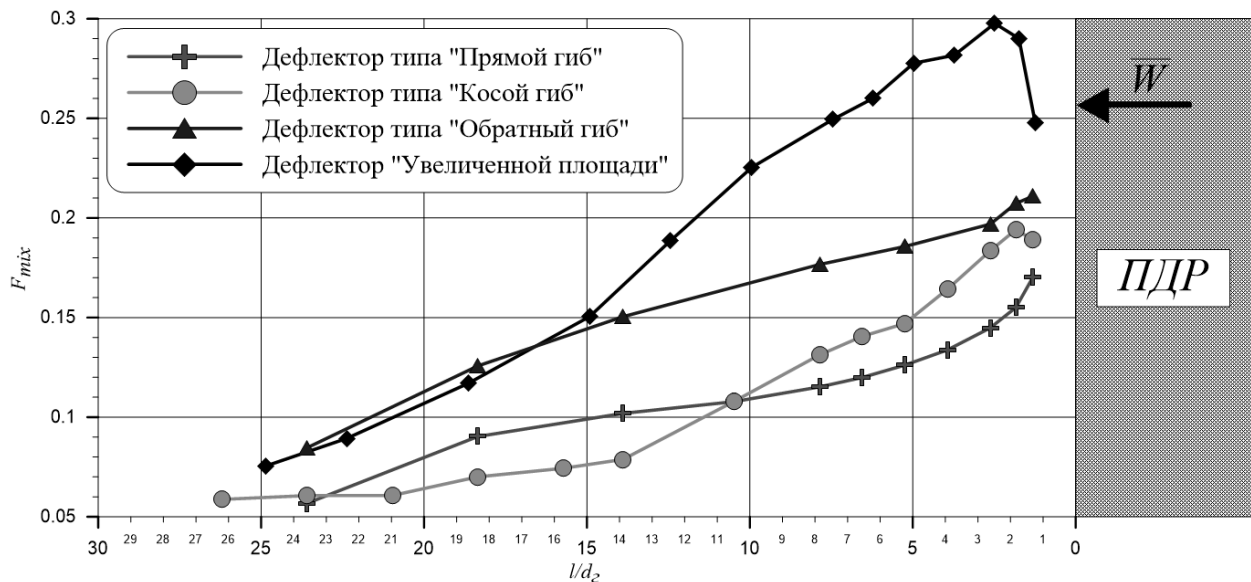


Рис. 7. Значения параметра межъячейкового обмена F_{mix} в регулярной ячейке ТВС-КВАДРАТ

Выводы

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

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

2. Форма вихревой структуры, образовавшейся за ПДР, зависит от угла линиигиба дефлектора относительно верхней кромки пластины ПДР.

3. 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 зависит от профиля дефлекторов и площади перекрытия дефлекторами проходного сечения ячеек ТВС-Квадрат.

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

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

6. Наибольшие значения параметра межъячейкового обмена по всей длине наблюдаются 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.

Данная работа выполнена в рамках выполнения базовой части государственного задания №12/17-01.10.

Библиографический список

1. **Дмитриев, С.М.** Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах / С.М. Дмитриев [и др.]. – М.: Машиностроение. – 2013.
2. Методы обоснования теплотехнической надежности активной зоны тепловых водо-водяных реакторов / А.А. Баринов [и др.] // Атомная энергия. – 2016. - Т. 120. – Вып. 5. - С. 270–275.
3. Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в ТВС-Квадрат реакторов PWR с перемешивающими решетками / А.В. Варенцов [и др.] // Теплоэнергетика. – 2014. – №8. – С. 20-27.
4. Особенности локальной гидродинамики и массообмена теплоносителя в ТВС реакторов ВВЭР и PWR с перемешивающими решетками / С.С. Бородин [и др.] // Тепловые процессы в технике. – 2014. – Т. 5. – Вып 3. – С. 98–107.
5. **Жуков, А.В.** Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов: Теоретические основы и физика процесса / А.В. Жуков [и др.]. – М.: Энергоатомиздат. – 1989.
6. **Гухман, А.А.** Введение в теорию подобия / А.А. Гухман [и др.]. – М.: Высшая школа. - 1973.
7. **Митрофанова, О.В.** Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок / О.В. Митрофанова [и др.] – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2010.

*Дата поступления
в редакцию 31.10.2017*

S.M. Dmitriev, D.V. Doronkov, M.A. Legchanov, V.D. Sorokin, A.E. Khrobostov

FEATURE OF CONVECTIVE TURBULENT FLOW BEHIND THE MIXING SPACER GRID OF THE TVS-KVADRAT OF THE PWR-TYPE REACTOR

The Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: The main objective of the research was to experimental investigations of the influence of mixing spacer grids with different types of deflectors on the coolant flow in the TVS-Kvadrat fuel assembly of the PWR-type reactor.

Design/methodology/approach: Investigations were conducted on an aerodynamic stand with the use of a multichannel pneumometric probe.

Results: Analysis of the spatial distribution of projections of the absolute flow velocity permitted detailing the coolant flow pattern behind the mixing spacer grid with various types of deflectors of mixing grids. The results obtained in the present paper are used to verify three-dimensional CFD programs, and in applied cell by cell codes they also serve as a database in calculations of thermotechnical reliability of the cores of PWR-type reactors with the TVS-Kvadrat.

Key words: nuclear reactor, core, fuel assembly, mixing spacer grid, coolant hydrodynamics.