

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-258-268>

УДК 621.039

Закономерности формирования потока теплоносителя за перемешивающей дистанционирующей решеткой ТВС-Квадрат реактора PWR*

С. М. Дмитриев¹⁾, Д. В. Доронков¹⁾, М. А. Легчанов¹⁾, В. Д. Сорокин¹⁾,
А. Е. Хробостов¹⁾

¹⁾Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексева
(Нижний Новгород, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. В статье представлены результаты экспериментальных исследований влияния перемешивающих дистанционирующих решеток с различными вариантами конструкции дефлекторов на течение потока теплоносителя в ТВС-Квадрат реактора PWR. Экспериментальные модели ТВС-Квадрат реактора PWR были изготовлены в полном геометрическом подобии с натурными кассетами. Исследования проводились путем моделирования течения теплоносителя в активной зоне на экспериментальном стенде, представляющем собой аэродинамический разомкнутый контур, через который прокачивается воздух. Для измерения локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя использовались специальные пневмометрические датчики, позволяющие измерять полный вектор скорости в точке по трем его компонентам. 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 детализировать картину течения теплоносителя за перемешивающими дистанционирующими решетками с различными вариантами конструкции дефлекторов, а также выбрать дефлектор оптимального конструктивного исполнения. Накопленная база данных по течению теплоносителя в ТВС-Квадрат легла в основу инженерного обоснования конструкций активных зон реакторов PWR. Рекомендации по выбору оптимальных вариантов конструкций перемешивающих дистанционирующих решеток учитывались конструкторами АО «ОКБМ Африкантов» при создании вводимых в эксплуатацию новейших ТВС-Квадрат. 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.

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

Для цитирования: Закономерности формирования потока теплоносителя за перемешивающей дистанционирующей решеткой ТВС-Квадрат реактора PWR / С. М. Дмитриев [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 3. С. 258–268. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-258-268>

Адрес для переписки

Дмитриев Сергей Михайлович
Нижегородский государственный технический
университет имени Р. Е. Алексева
ул. Минина, 24
603950, г. Нижний Новгород,
Российская Федерация
Тел.: +7 831 436-23-25
dmitriev@nntu.nnov.ru

Address for correspondence

Dmitriev Sergei M.
Nizhny Novgorod State Technical
University named after R. E. Alekseev
24 Minin str.,
603950, Nizhny Novgorod,
Russian Federation
Tel.: +7 831 436-23-25
dmitriev@nntu.nnov.ru

* Данная работа осуществлена в рамках выполнения базовой части Государственного задания № 12/17-01.10.

Regularities of Formation of Flow of Coolant behind the TVS-Kvadrat Mixing Spacing Grid of the PWR-Type Reactor

S. M. Dmitriev¹⁾, D. V. Doronkov¹⁾, M. A. Legchanov¹⁾, V. D. Sorokin¹⁾,
A. E. Khrobostov¹⁾

¹⁾Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev
(Nizhny Novgorod, Russian Federation)

Abstract. This paper presents the results of experimental investigations of the influence of mixing spacer gratings with different types of deflectors on the coolant flow in the TVS-Kvadrat fuel assembly of the PWR-type reactor. Experimental model of the TVS-Kvadrat of the PWR reactor was made in complete geometric similarity with the full-scale cassettes. Studies were carried out by modeling the flow of coolant in the core with the use of an experimental stand; the latter was an aerodynamic open loop through which air is pumped. To measure the local hydrodynamic characteristics of the coolant flow, special pneumatic sensors were used that were able to measure the full velocity vector at the point by its three components. During the studies of the local fluid dynamics of the coolant, the transverse flow rates were measured; also, the coolant flow rates were measured by cells of the TVS-Kvadrat experimental model. The analysis of the spatial distribution of the projections of the absolute flow velocity made it possible to detail the pattern of the coolant flow behind the mixing spacing gratings with different variants of the deflector design, as well as to choose the deflector of the optimal design. Accumulated data base on the flow of the coolant in the TVS-Kvadrat fuel assembly formed the basis of the engineering justification of the structures of the active zones of PWR reactors. Guidelines for choosing optimal designs mixing spacing grids have been considered by designers of the "Afrikantov OKBM" JSC when they created implementations of the latest TVS-Kvadrat assemblies. The results of experimental studies are used to verify CFD-codes of both foreign and domestic origin, as well as the programs for detailed cell-by-cell calculation of active zones in order to reduce conservatism in the justification of thermal reliability.

Keywords: nuclear reactor, core, fuel assembly, mixing spacer grating, coolant hydrodynamics

For citation: Dmitriev S. M., Doronkov D. V., Legchanov M. A., Sorokin V. D., Khrobostov A. E. (2018) Regularities of Formation of Flow of Coolant behind the TVS-Kvadrat Mixing Spacing Grid of the PWR-Type Reactor. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (3) 258–268. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-258-268> (in Russian)

Введение

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 тепловыделяющей сборке (ТВС) для водо-водяных энергетических реакторов 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, а именно: геометрии и расположению дефлекторов, а также выбору угла отгиба их относительно осевого направления движения потока теплоносителя. Сле-

довательно, 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 исследование распределения гидродинамических характеристик потока в характерных областях ТВС-Квадрат за различными типами перемешивающих дистанционирующих решеток является актуальной задачей, решение которой необходимо при обосновании теплотехнической надежности активной зоны реактора PWR.

Экспериментальный стенд

Для изучения особенностей течения потока теплоносителя в Институте ядерной энергетики и технической физики Нижегородского государственного технического университета имени Р. 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 он проходит успокоительный участок, ЭМ и выбрасывается в атмосферу. Таким образом, на стенде моделируются гидродинамические условия течения потока теплоносителя [4, 5].

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

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

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

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

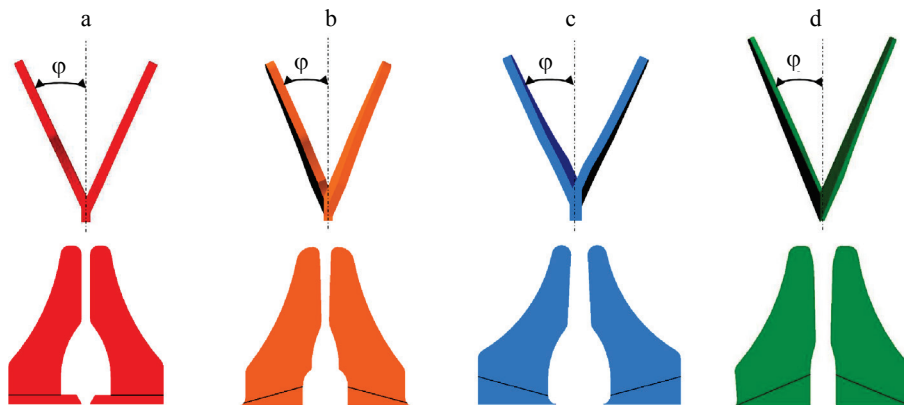


Рис. 1. Исследуемые типы дефлекторов на перемешивающих дистанционирующих решетках ТВС-Квадрат ($\varphi = 25^\circ$): 1 – дефлектор типа «прямой гиб»; 2 – типа «косой гиб»; 3 – типа «обратный гиб»; 4 – «увеличенной площади»

Fig. 1. Investigated types of deflectors on the spacer mixing gratings of TVS-Kvadrat ($\varphi = 25^\circ$): 1 – “direct bend” type deflector; 2 – “oblique bend” type deflector; 3 – “reverse bend” type deflector; 4 – “larger” type deflector

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.

Измерение направления и величины скорости, а также давления в пространственном потоке осуществлялось пневмометрическим зондом, представляющим собой пять стальных капилляров, расположенных в двух перпендикулярных друг к другу диаметральных плоскостях, срезанных 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 на 5,0 %. Предельные отклонения проекций абсолютной скорости на осях X , Y , Z не превышают 7,5 % от абсолютной скорости. Снятие показате-

ний с зонда осуществлялось с помощью блока аналоговых преобразователей давления. Предел допускаемой основной погрешности данных приборов составляет $\pm 0,25\%$ [6, 7].

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 [8, 9].

С целью нахождения нижней границы зоны автомодельности на стенде проведены исследования в диапазоне чисел Рейнольдса $(2 \cdot 10^4) - (1 \cdot 10^5)$, которые заключались в построении эмпирической зависимости коэффициента сопротивления трению 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 $Re = 7 \cdot 10^4$.

Также необходимое условие обоснования представительности исследований – это 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 перемешивающих дистанционирующих решеток ТВС-Квадрат
Local hydraulic resistance coefficient of the spacer mixing gratings of TVS-Kvadrat

Тип решетки и дефлектора	Коэффициент гидравлического сопротивления решетки
Перемешивающая дистанционирующая решетка 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.

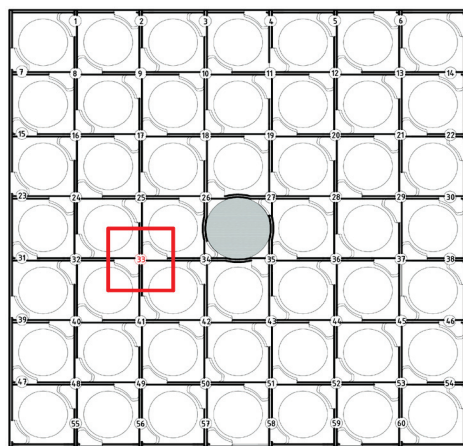


Рис. 2. Поперечное сечение экспериментальной модели

Fig. 2. Cross section of the experimental model

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). 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, расположенные около твэлов (рис. 3а), а при угле 15° (дефлекторы типов «косой гиб», «обратный гиб» и «увеличенной площади») образуется один вихрь в центре ячейки (рис. 3 б–д).

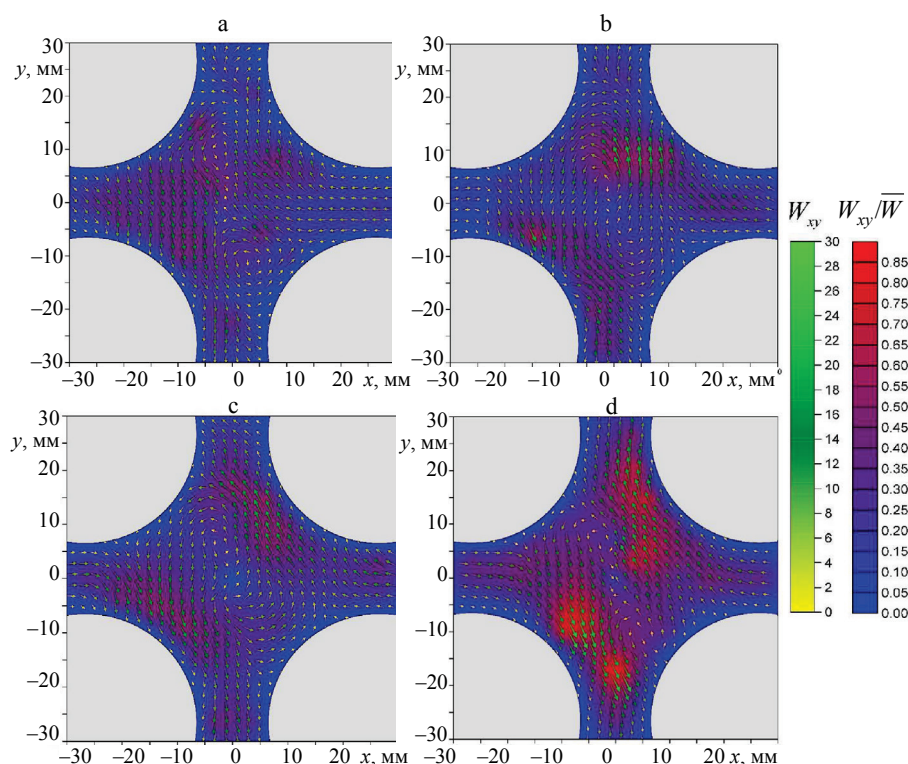


Рис. 3. Векторное поле в регулярной ячейке за исследуемыми дефлекторами перемешивающих дистанционирующих решеток модели на расстоянии $l/d_r = 1,3$ от решетки: 1, 2, 3 – векторное поле за дефлекторами типов «прямой гиб», «косой гиб», «обратный гиб»; 4 – векторное поле за дефлекторами «увеличенной площади»

Fig. 3. Vector field in the regular cell behind the investigated deflectors of the spacer mixing gratings at distance $l/d_r = 1.3$ from the grating: 1, 2, 3 – vector field behind the “direct bend” type deflector, “oblique bend”, “reverse bend”; 4 – vector field behind the “larger” type deflector

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. 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.

3. Затухание поперечных скоростей за ПДР с дефлекторами типов «косой гиб» и «прямой гиб» происходит на расстоянии $l/d_r \approx 15$, для ПДР с дефлекторами типа «обратный гиб» – на расстоянии $l/d_r \approx 24$. За дефлекторами «увеличенной площади» на расстоянии за ПДР $l/d_r = 25$ значение поперечной скорости $W_{xy}/\bar{W} = 0,16$. Данный факт говорит о том, что увеличение площади перекрытия дефлекторами проходного сечения ячеек при-

водит к росту длины затухания поперечных скоростей потока теплоносителя (рис. 5).



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

Fig. 4. The dependence of life length of vortex structures and the intensity of the turbulent flows between the adjacent TVS-Kvadrat regular cells on the area of the deflector

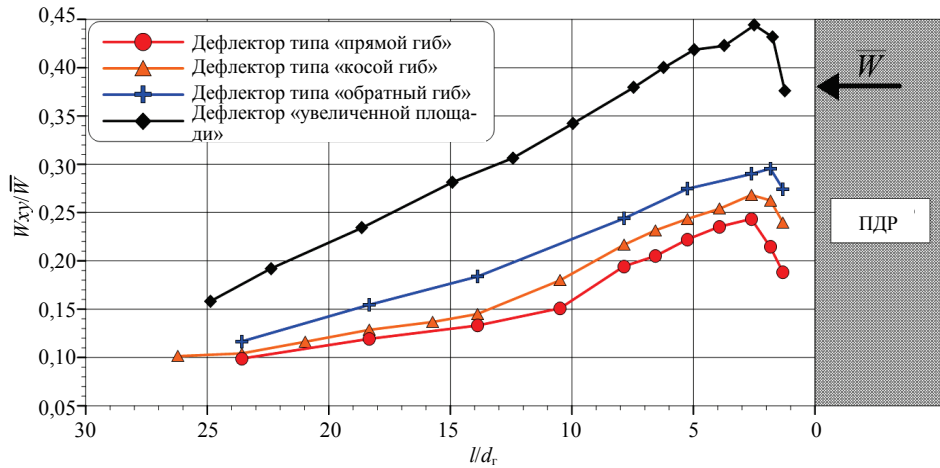


Рис. 5. Распределение относительной поперечной скорости W_{xy}/\bar{W} в межтвэльных зазорах регулярной ячейки ТВС-Квадрат

Fig. 5. The distribution of the relative transverse velocity W_{xy}/\bar{W} in the gaps between fuel rods of the TVS-Kvadrat regular cell

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

Для сравнения различных типов дефлекторов ПДР ТВС-Квадрат целесообразно использовать следующие параметры [10]:

1) параметр межъячейкового обмена

$$F_{mix} = \frac{1}{S} \int \frac{|v_{cross}|}{u} dy, \quad (1)$$

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

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

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, определено, что при фиксированной координате l/d_r за любым из исследуемых дефлекторов данный коэффициент меняет знак (рис. 6). Это 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 с дефлектором типа «прямой гиб» – при $l/d_r \approx 23$.

Расчеты параметра межъячейкового обмена между регулярными ячейками показали, что наибольшие его значения по всей длине за ПДР наблюдаются при установке на ПДР дефлекторов «увеличенной площади» (рис. 7).

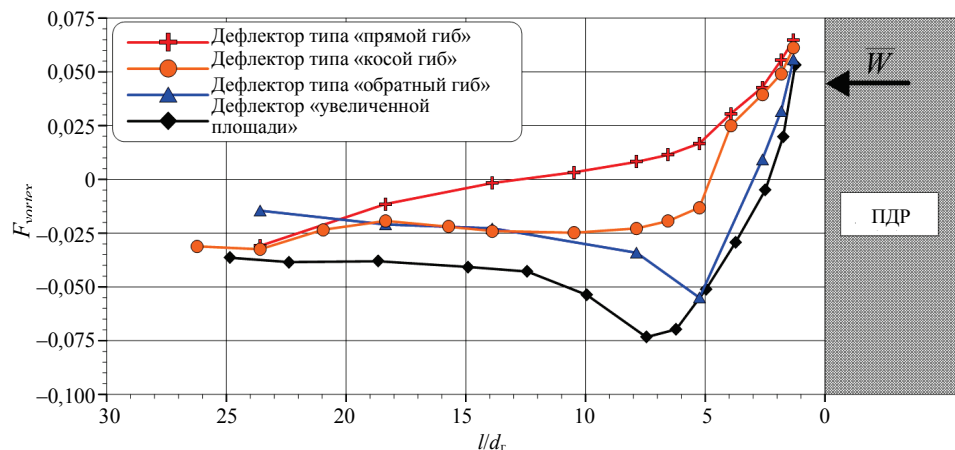


Рис. 6. Параметры завихренности потока F_{vortex} в регулярной ячейке ТВС-Квадрат

Fig. 6. Intensity of vortex action of the flow F_{vortex} in the TVS-Kvadrat regular cell

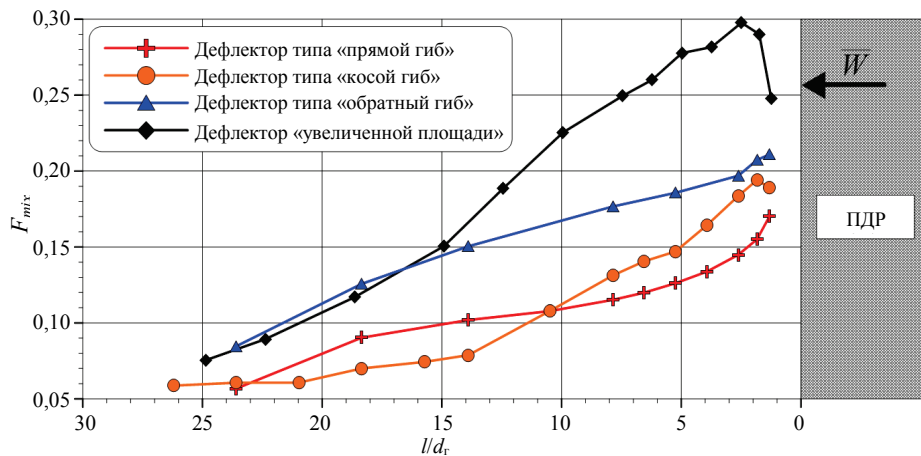


Рис. 7. Параметры межъячейкового обмена F_{mix} в регулярной ячейке ТВС-Квадрат

Fig. 7. Intercellular exchange parameters F_{mix} in the TVS-Kvadrat regular cell

ВЫВОДЫ

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

2. Длина жизни вихря и интенсивность направленных турбулентных течений между соседними ячейками за различными дефлекторами перемешивающих дистанционирующих решеток 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_r 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 наблюдаются при установке на перемешивающих дистанционирующих решетках дефлекторов «увеличенной площади».

6. 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах / С. М. Дмитриев [и др.]. М.: Машиностроение. 2013. 413 с.
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. <https://doi.org/10.1134/s0040363614080050>.

3. Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в ТВС-Квадрат реакторов PWR с перемешивающими решетками / С. М. Дмитриев [и др.] // Теплоэнергетика. 2014. № 8. С. 20–27. <https://doi.org/10.1134/s0040363614080050>.
 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. Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР / С. М. Дмитриев [и др.] // Атомная энергия. 2012. Т. 113, вып. 5. С. 252–257.
 6. Расчетно-экспериментальные исследования локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА реакторов ВВЭР с перемешивающими решетками / С. С. Бородин [и др.] // Тепловые процессы в технике. 2015. Т. 4. С. 177–182.
 7. Экспериментальное исследование влияния дистанционирующей решетки на структуру течения в ТВС реактора АЭС-2006 / О. Н. Кашинский [и др.] // Теплоэнергетика. 2013. № 1. С. 63–67. <https://doi.org/10.1134/s0040363612070065>
 8. Жуков, А. В. Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов: теоретические основы и физика процесса / А. В. Жуков, А. П. Сорокин, Н. М. Матюхин. М.: Энергоатомиздат, 1989. 183 с.
 9. Гухман, А. А. Введение в теорию подобия / А. А. Гухман. М.: Высш. шк., 1973. 295 с.
 10. Митрофанова, О. В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок / О. В. Митрофанова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 288 с.
- Поступила 17.11.2017 Подписана в печать 22.01.2018 Опубликована онлайн 30.05.2018

REFERENCES

1. Dmitriev S. M., Zverev D. L., Bykh O. A., Panov Yu. K., Sorokin N. M., Farafonov V. A. (2013) Basic Equipment of NPP with Thermal Neutron Shell-Type Reactors. Moscow, Mashinostroenie Publ. 413 (in Russian).
2. Barinov A. A., Dmitriev S. M., Khrobostov A. E., Samoiloov O. B. (2016) Methods of Substantiation of Thermal Reliability of the Core of Thermal Water-Water Reactors. Atomic Energy, 120 (5), 335–341. <https://doi.org/10.1007/s10512-016-0140-9>.
3. Dmitriev S. M., Samoiloov O. B., Khrobostov A. E., Varentsov A. V., Dobrov A. A., Doronkov D. V., Sorokin V. D. (2014) Ombined Numerical and Experimental Investigations of Local Hydrodynamics and Coolant Flow Mass Transfer in Kvadrat-Type Fuel Assemblies of PWR Reactors with Mixing Grids. Thermal Engineering, 61 (8), 558–565. <https://doi.org/10.1134/s0040601514080059>.
4. Borodin S. S., Dmitriev S. M., Legchanov M. A., Solntsev D. N., Sorokin V. D., Khrobostov A. E. (2014) Specific Features of Local Hydrodynamics and Mass Transfer of the Coolant in Fuel Assemblies of VVER and PWRs Reactorts with Mixing Gratings. Teplovye Protssesy v Tekhnike = Thermal Processes in Engineering, 5 (3), 98–107 (in Russian).
5. Dmitriev S. M., Borodin S. S., Legchanov M. A., Solntsev D. N., Sorokin V. D., Khrobostov A. E. (2013) Experimental Studies of Hydrodynamic and Mass-Transfer Properties of Coolant Flow in VVER Fuel Assemblies TVSA. Atomic Energy, 113 (5), 314–319. <https://doi.org/10.1007/s10512-013-9638-6>.
6. Borodin S. S., Varentsov A. V., Dobrov A. A., Dmitriev S. M., Pronin A. N., Solntsev D. N., Sorokin V. D., Khrobostov A. E. (2015) Numerical and Experimental Investigation of the Local Hydrodynamic and Mass Transfer Characteristics of the Flow of the Heat Carrier in the Alternative Fuel Assembly of VVER Reactors with Mixing Grids. Teplovye Protssesy v Tekhnike = Thermal Processes in Engineering, (4), 177–182 (in Russian).
7. Kashinskii O. N., Lobanov P. D., Pribaturin N. A., Kurdyumov A. S., Volkov S. E. (2013) Experimental Study of the Effect of Spacer grid on the Flow Structure in Fuel Assemblies of the AES 2006 Reactor. Thermal Engineering, 60 (1), 62–66. <https://doi.org/10.1134/s0040601512070063>.
8. Zhukov A. V., Sorokin A. P., Matyukhin N. M. (1989) Interchannel Exchange in Fuel Assemblies of Fast Reactors: a Theoretical Framework and Physics. Moscow, Energoatomizdat Publ. 183 (in Russian).
9. Gukhman A. A. (1973) Introduction to the Theory of Similarity. Moscow, Vysshaya Skola Publ. 295 (in Russian).
10. Mitrofanova O. V. (2010) Fluid Flow and Heat Transfer of Swirling Flows in Channels of Nuclear Power Plants. Moscow, Fizmatlit Publ. 288 (in Russian).

Received: 17 November 2017

Accepted: 22 January 2018

Published online: 30 May 2018