

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ В ОБЛАСТИ НАПРАВЛЯЮЩЕГО КАНАЛА ЗА ПЕРЕМЕШИВАЮЩИМИ ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИМИ РЕШЕТКАМИ ТВС РЕАКТОРА ТИПА PWR¹

© 2021 г. С. М. Дмитриев^а, А. В. Герасимов^{а, *}, А. А. Добров^а, Д. В. Доронков^а, А. П. Живодеров^а, Е. В. Рубцова^а, А. В. Рязанов^а, Д. Н. Солнцев^а, А. Н. Пронин^а, А. Е. Хробостов^а

^аНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
ул. Минина, д. 24, г. Нижний Новгород, 603155 Россия

*e-mail: poorvenom@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.08.2019 г.

После доработки 18.06.2020 г.

Принята к публикации 24.06.2020 г.

Приведены результаты исследований течения теплоносителя в тепловыделяющих сборках за перемешивающими дистанционирующими решетками реактора типа PWR. Цель работы — оценка эффективности применения перемешивающих решеток различных конструкций. Для достижения поставленной цели были проведены экспериментальные исследования на аэродинамическом стенде с масштабными моделями фрагментов топливных кассет с перемешивающими дистанционирующими решетками разных конструкций. В качестве показательной области исследований были выбраны две смежные ячейки области направляющего канала, конструктивной особенностью которых является различная пространственная ориентация турбулизаторов, установленных на решетках-интенсификаторах. Общая картина течения представлена векторными полями тангенциальных скоростей, а также распределением относительных скоростей в зазорах между твэлами и направляющим каналом. Для оценки эффективности применения конструкций решеток относительно перемешивания потока теплоносителя был проведен анализ коэффициентов внутриячейкового вихреобразования и межячейкового перемешивания. В результате этого анализа показано, что в альтернативной конструкции изменение направления пары дефлекторов ячейки позволило увеличить коэффициент межячейкового обмена в 1.13 раза относительно базовой конструкции, а коэффициент внутриячейкового вихреобразования — в 2.2 раза. Следовательно, использование решетки альтернативной конструкции в целях лучшего перемешивания потока теплоносителя является более предпочтительным. Накопленная база данных по течению теплоносителя в ТВС-Квадрат служит для инженерного обоснования конструкций 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 для уменьшения консерватизма при обосновании их теплотехнической надежности.

Ключевые слова: перемешивающие решетки, дефлекторы, направляющий канал, аэродинамический стенд, внутриячейковое вихреобразование, межячейковое перемешивание

DOI: 10.1134/S0040363621020016

С учетом результатов исследовательских работ, проведенных в целях обоснования работоспособности тепловыделяющих сборок (ТВС), а также опыта конструирования и эксплуатации топливных сборок [1] были предложены перемешивающие дистанционирующие решетки (ПДР) двух типов. Особенность конструкций данных решеток заключается в установке дополнительных турбулизаторов-дефлекторов, имеющих различную форму

и пространственную ориентацию, которые создают интенсивную вихревую структуру внутри ячейки и поперечное перетекание теплоносителя между соседними ячейками, расположенными в области направляющего канала (НК). Учет этих процессов очень важен при конструировании дистанционирующих и перемешивающих элементов, а также при оценке эффективности использования данных конструкций для перемешивания потока теплоносителя [2]. Перемешивание потока способствует интенсификации процесса конвективного теплообмена на поверхности тепловыделяющих элементов и увеличивает поперечное

¹ В работе использовалась методика расчета векторных полей тангенциальных скоростей, разработанная за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 18-19-00473).

межъячеековое перетекание, приводящее к выравниванию неоднородностей поля температур в поперечном сечении тепловой сборки, что способствует увеличению запаса до кризиса теплоотдачи.

Влияние формы дефлекторов, пластин и дистанционирующих элементов на перемешивание потока и вихреобразование в пучках твэлов изучено недостаточно, поэтому однозначно оценить воздействие данных конструктивных особенностей на картину течения практически невозможно из-за сложности протекания процессов в пучках стержней, в частности наличия вторичных течений и явления анизотропии турбулентности [3–7].

Для установления основных закономерностей движения теплоносителя за перемешивающими решетками применяют подходы, базирующиеся на изучении поперечного массообмена с использованием трассерных методов и лазерной доплеровской техники, а также на измерении температурных полей в потоке теплоносителя [8–11]. В этих работах проводилось исследование течения теплоносителя в каналах ТВС за ПДР, представленными только регулярными ячейками, образованными взаимным расположением твэлов.

В настоящей работе исследование выполняется в ячейках области НК, имеющих в поперечном сечении отличную от регулярных ячеек асимметричную форму. Кроме того, диаметр НК больше диаметра твэлов, что не позволяет применять дефлекторы аналогичные дефлекторам, расположенным в регулярных ячейках. Отличительная особенность формы дефлекторов рассматриваемых в данной работе ПДР — принципиально большая площадь поверхности основания в месте закрепления их на решетке, чем в конструкциях, изучавшихся ранее. Поэтому изучение области ячеек НК является наиболее показательным в общем составе ТВС.

Ранее коллективом авторов экспериментально исследовалась гидродинамика теплоносителя в ячейках НК и регулярных ячейках [12]. В рамках данных исследований был выполнен сравнительный анализ гидродинамической картины течения теплоносителя в регулярных ячейках и ячейках области НК с базовой схемой ориентации дефлекторов, но не проводился выбор оптимальной схемы расположения дефлекторов в ячейках НК.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Комплекс экспериментальных исследований, направленных на изучение течения потока в ТВС, выполнялся на аэродинамическом стенде, включающем в себя экспериментальную модель — канал квадратного сечения, в котором размещена изучаемая перемешивающая дистанционирующая решетка [13–20]. Использование воздуха в качестве рабочей среды обусловлено необходимостью

выхода режима движения потока в экспериментальной модели в область автомодельного течения для соблюдения условий теории гидродинамического подобия [3]. При проведении экспериментальных исследований учитывалось геометрическое и кинематическое подобие процессов.

Модели фрагментов решеток-интенсификаторов представляют собой две группы взаимно пересекающихся пластин, в поперечном сечении образующих ячейки квадратной формы, в центре которых размещены дистанционирующие элементы с закрепленными в них твэлами; в центральной ячейке размещен направляющий канал.

По длине экспериментальной модели за ПДР выбраны характерные сечения, в которых проводились измерения (рис. 1) для изучения течения потока. Для измерения полного вектора скорости в показательной области направляющего канала использовался специальный пневмометрический зонд [21].

Базовая (рис. 2, а) и альтернативная конструкции перемешивающей решетки (рис. 2, б) различаются между собой пространственной ориентацией и профилем дефлекторов в показательных ячейках Туре 1 и Туре 2. Расположение области исследований в поперечном сечении модели представлено на рис. 2, в. Конструктивные особенности этих ячеек следующие:

в базовой конструкции дефлекторы области НК ориентированы в пространстве подобно области регулярных ячеек (рис. 3, а), а в ячейке Туре 2 затесненный направляющим каналом дефлектор имеет уменьшенную площадь перекрытия (см. рис. 2, а), ограниченную профилем НК и пластины (рис. 3, б);

в альтернативной конструкции ячейка Туре 1 идентична аналогичной ячейке базовой конструкции, в ячейке Туре 2 изменено направление отгиба дефлекторов на обратное и увеличена площадь перекрытия затесненного дефлектора профилем НК до аналогичного значения для дефлектора в ячейке Туре 1 конструкций обоих типов (см. рис. 2, б).

Угол отгиба $\beta = 25^\circ$ (см. рис. 3, в) и угол наклона линии отгиба $\alpha = 15^\circ$ (см. рис. 3, а) остаются одинаковыми для всех представленных конструкций.

Анализ интенсивности течения теплоносителя производится с использованием коэффициентов межъячеекового перетекания F_m (интегральная интенсивность скоростей в зазорах) и внутри-ячеекового вихреобразования F_{vor_mom} (интегральный параметр закрутки потока для переменного поля скорости) [2]:

$$F_m = \frac{1}{l_{rod}} \int_0^l \frac{w_p}{\bar{w}} dl; \quad (1)$$

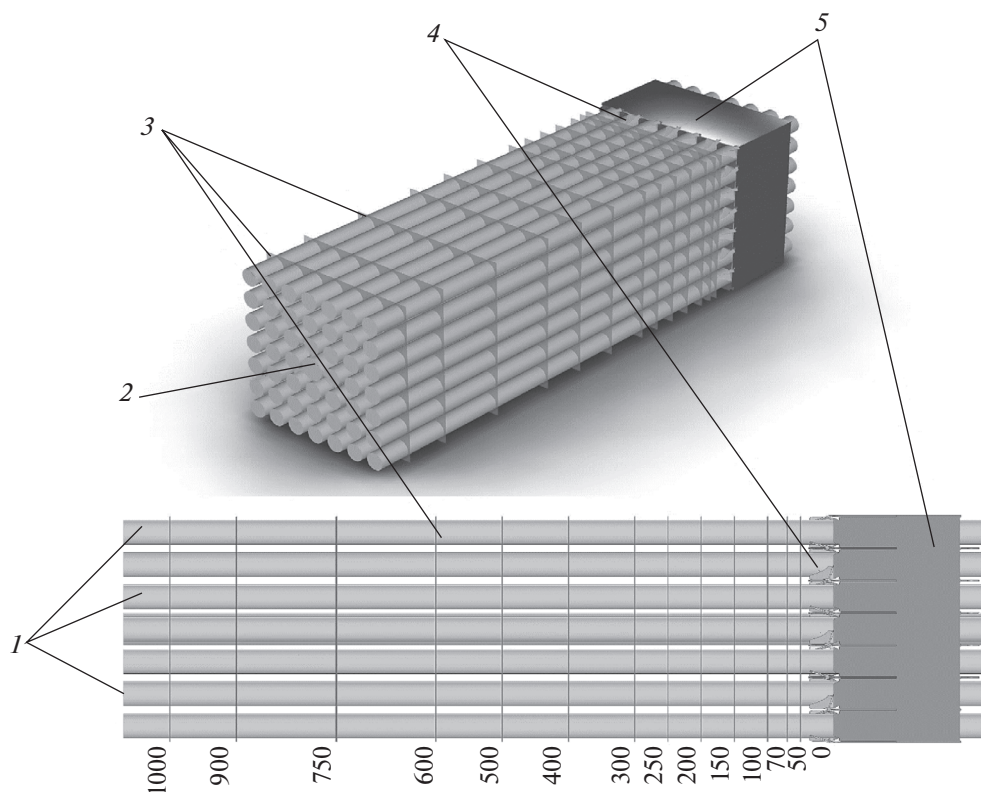


Рис. 1. Общий вид пучка твэлов модели с установленной ПДР и схема расположения сечений измерения гидродинамических характеристик потока.

1 – твэл; 2 – направляющий канал; 3 – поперечные плоскости; 4 – дефлекторы; 5 – ПДР

$$F_{vor_mom} = \frac{\int_{-r}^r r^2 V_{tan} U_z dr}{R \int_{-r}^r r U_z^2 dr}, \quad (2)$$

где l – расстояние между твэлами в зазоре; l_{rod} – длина зазора между твэлами или направляющим каналом и твэлом, м/с; w_p – составляющая вектора скорости в точке измерения составляющих вектора скорости потока, м/с; $\bar{w}$ – среднерасходная скорость, м/с; V_{tan} – тангенциальная скорость, м/с; U_z – аксиальная составляющая абсолютной скорости, м/с; r – расстояние от центра ячейки до измеряемой точки в зазоре, м; R – минимальное расстояние от центра ячейки до твэла или направляющего канала, м.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования коэффициента гидравлического сопротивления (КГС) решетки-интенсификатора проводились в диапазоне чисел Re от 20000 до 85000. Анализ полученных результатов показал, что изменение ориентации турбулизаторов повлияло на КГС незначительно, значение КГС

решетки изменилось менее чем на 1% и составило 1.25 при числе $Re = 85000$.

Локальные гидродинамические характеристики потока измерялись при числах $Re = 90000$. Данные исследования были направлены на определение проекций вектора абсолютной скорости в области НК, на основе которых строились векторные поля скоростей W_x и W_y в поперечных сечениях исследуемой модели на безразмерных расстояниях L/d_r (L – расстояние от края перемешивающей дистанционирующей решетки до точки измерения гидродинамических характеристик потока, т.е. до кончика чувствительной части пневмометрического зонда; d_r – гидравлический диаметр всей модели, т.е. квадратного канала с пучком твэлов), а также выявлялась графическая зависимость аксиальных и тангенциальных скоростей от этого безразмерного расстояния.

Векторные поля в зазоре решетки базовой конструкции для ячеек обоих типов показаны на рис. 4, а распределения относительных скоростей в этих ячейках – на рис. 5. Аналогичные характеристики для решетки альтернативной конструкции представлены на рис. 6 и 7.

На основе полученной картины течения потока и анализа локальных гидродинамических ха-

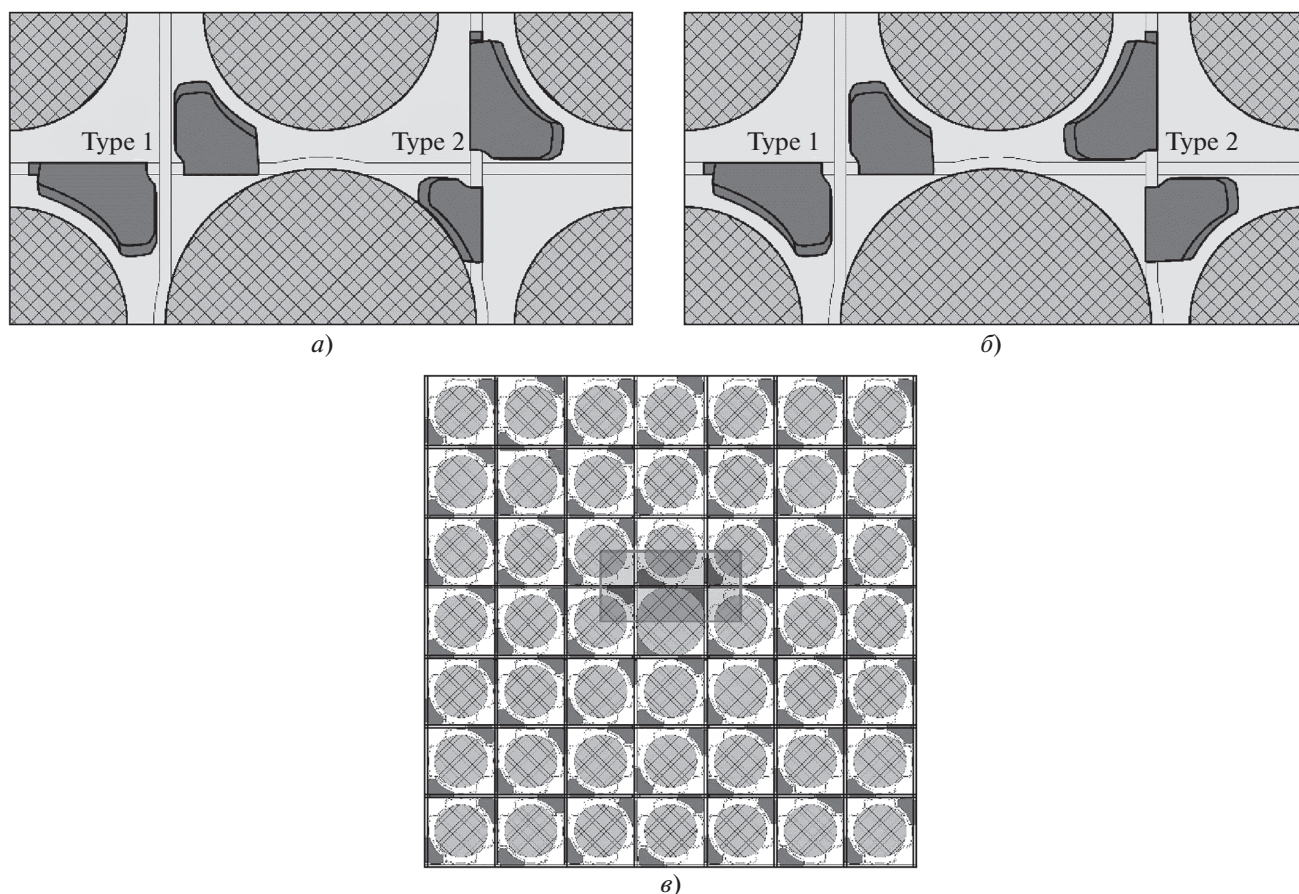


Рис. 2. Поперечное сечение экспериментальной модели области ячеек НК базовой конструкции (а), области ячеек НК альтернативной конструкции (б) и общий вид модели ПДР (в)

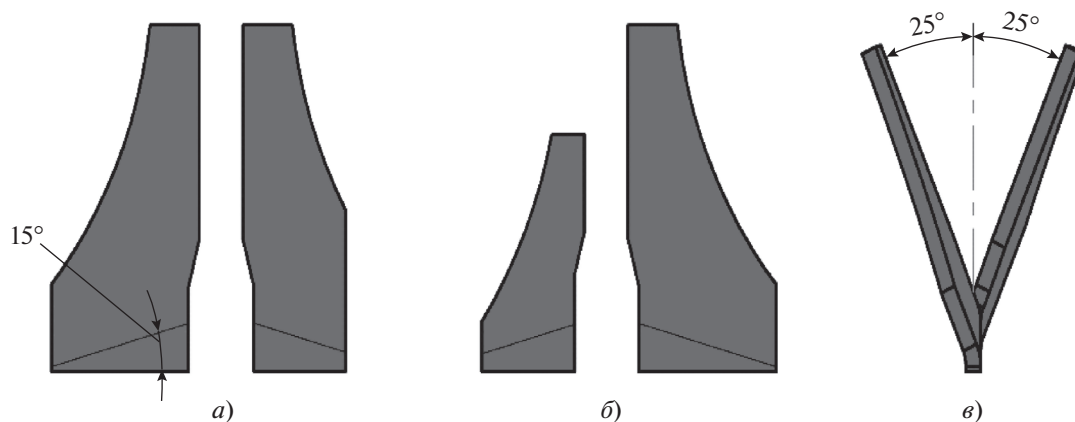


Рис. 3. Профили исследуемых дефлекторов в ячейках области НК.

а – дефлекторы, применяемые в ячейках Type 1 базовой и альтернативной конструкций ПДР; б – дефлекторы, применяемые в ячейках Type 2 базовой конструкций ПДР; в – вид сбоку

рактических характеристик базовой конструкции сделаны следующие выводы:

поток в ячейке Type 1 имеет интенсивную вихревую структуру, которая не рассеивается по всей исследуемой длине; вихрь изменяет свое положение в поперечной плоскости в сторону зазора,

смежного с ячейкой Type 2, на расстоянии $L/d_r = 22.5$ (см. рис. 4), в свою очередь в этой ячейке вихревая структура отсутствует;

в нижнем и левом зазорах ячейки Type 1 поперечное течение потока имеет интенсивный характер по всей длине исследуемой области и попереч-

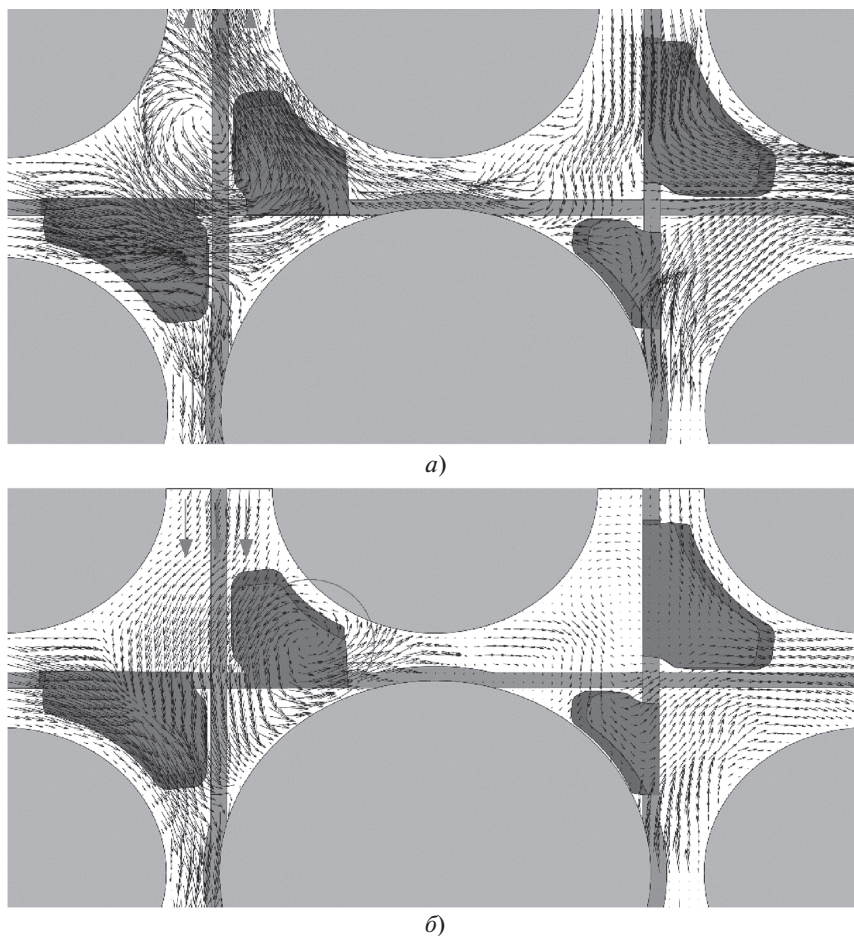


Рис. 4. Векторное поле скоростей за решеткой базовой конструкции.
Расстояние L/d_r : а – 2.5; б – 22.5

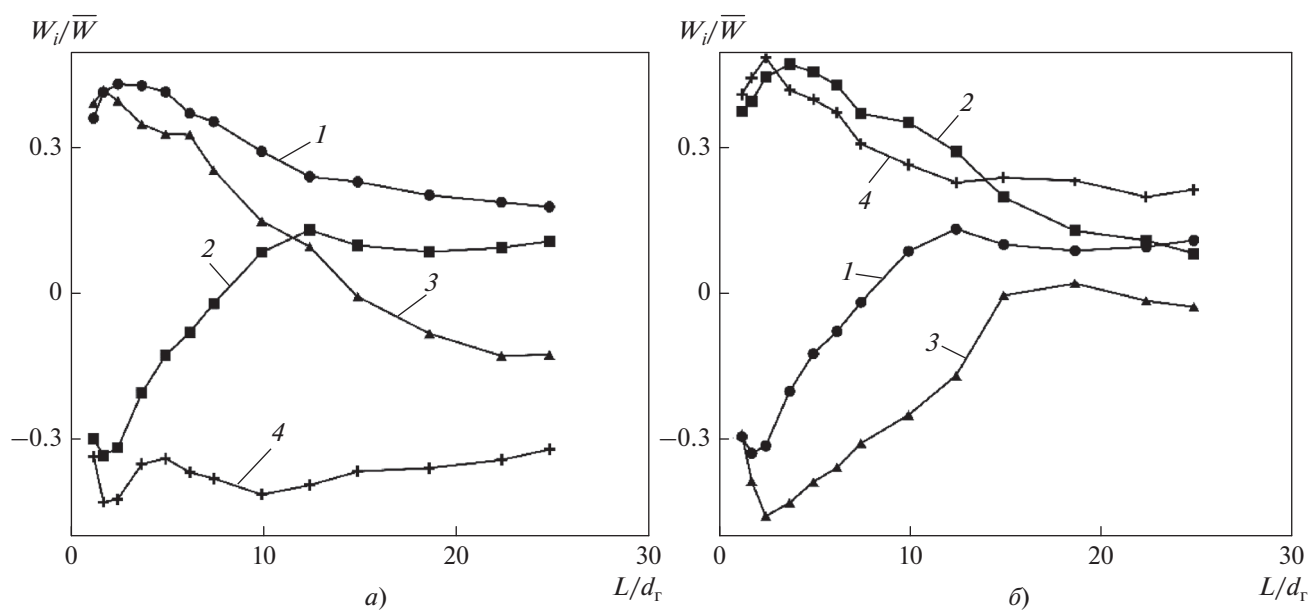


Рис. 5. Распределение относительных скоростей ($W_i/\bar{W}$) в зазорах между твэлами за решеткой базовой конструкции ячейки Type 1 (а) и Type 2 (б) ($\bar{W} = 33.29$ м/с).
Зазор: 1 – левый; 2 – правый; 3 – верхний; 4 – нижний

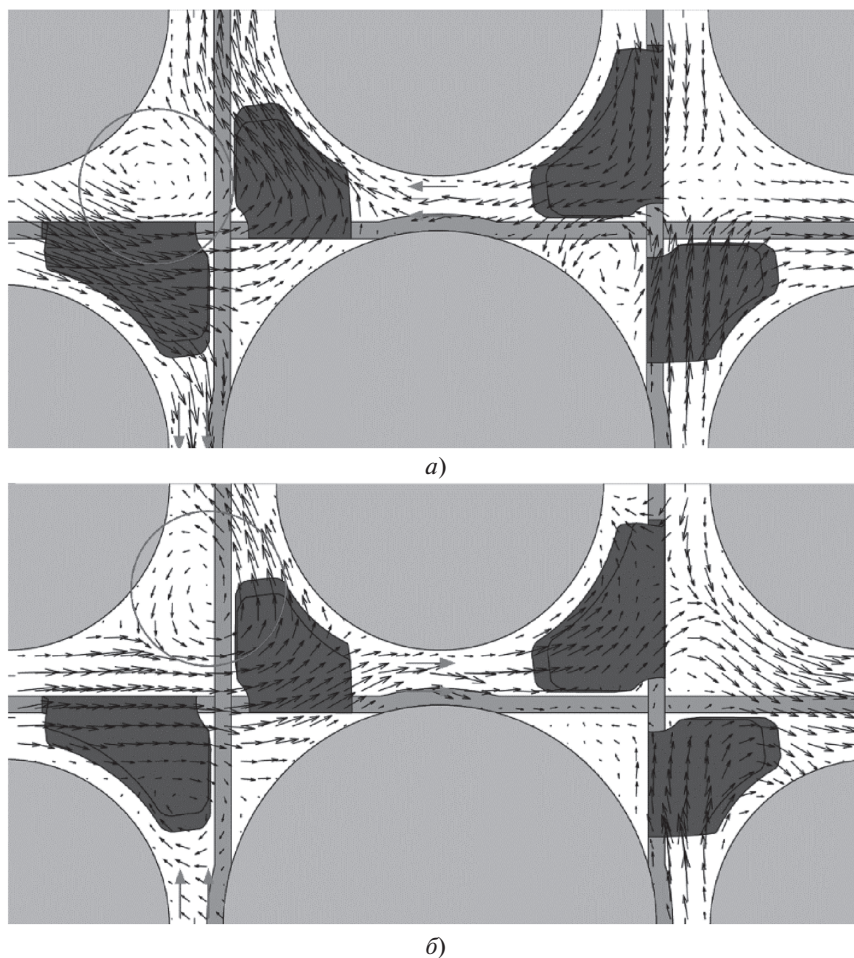


Рис. 6. Векторное поле скоростей альтернативной конструкции.
Расстояние L/d_r : а – 3.0; б – 13.6

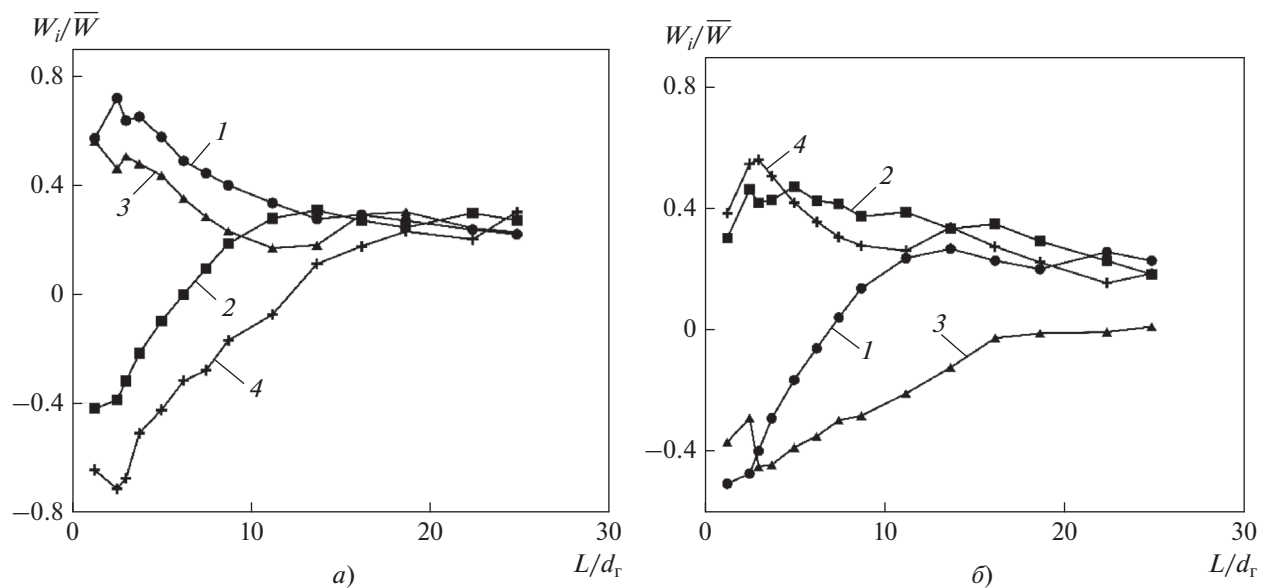


Рис. 7. Распределение относительной скорости ($W_i/\bar{W}$) в зазорах ячейки альтернативной конструкции Type 1 (а) и Type 2 (б) ($\bar{W} = 33.29$ м/с).
Обозначения см. рис. 5

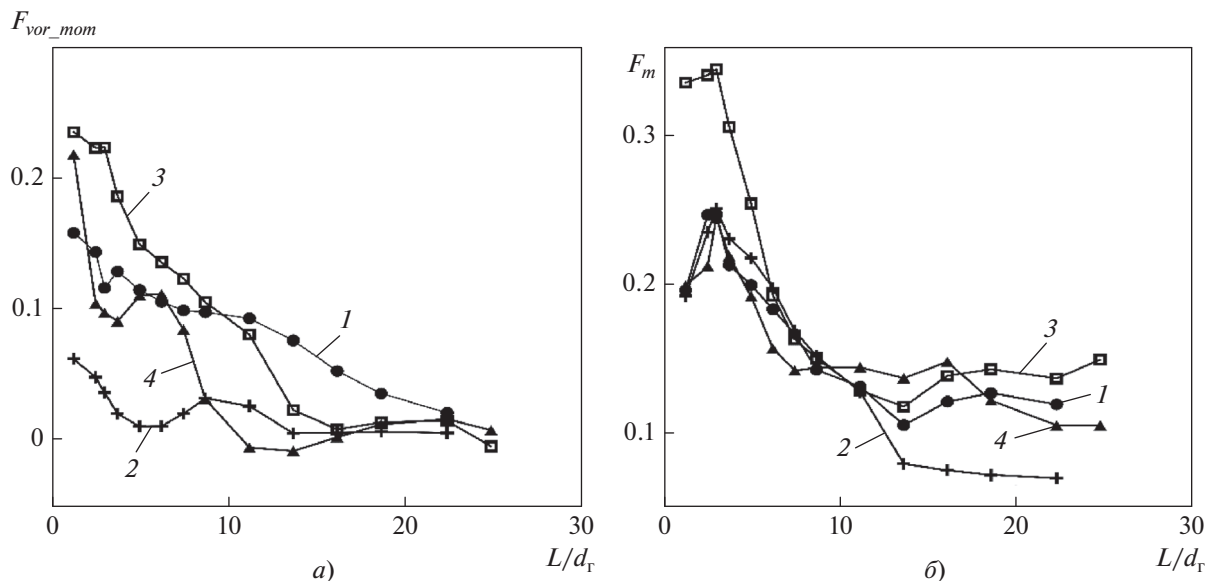


Рис. 8. Распределение коэффициентов F_{vor_mom} (а) и F_m (б).

1 – конструкция А, Туре 1; 2 – конструкция А, Туре 2; 3 – конструкция Б, Туре 1; 4 – конструкция Б, Туре 2

ные скорости в них составляют 0.2 и 0.3 относительно среднерасходной скорости соответственно (см. рис. 5). В ячейке Туре 1 теплоноситель меняет свое направление на обратное через верхний зазор на расстоянии $L/d_r = 15$, что обусловлено смещением вихря в сторону правого зазора (см. рис. 4). Межъячейковое перетекание потока через зазор между ячейками Туре 1 и Туре 2 меняет свое направление на обратное на расстоянии $L/d_r = 7.5$;

в правом и нижнем зазорах ячейки Туре 2 поперечное течение теплоносителя не изменяет своей направленности по всей исследуемой длине, тангенциальные скорости составляют 0.1 и 0.2 соответственно (см. рис. 5).

Полученная картина течения потока и анализ гидродинамики теплоносителя за альтернативной решеткой-интенсификатором дают возможность сделать следующие выводы:

в обеих ячейках области НК образуется интенсивная вихревая структура (см. рис. 6). В ячейке Туре 1 безразмерная длина, на которой поток сохраняет вихревую структуру течения, равна $L/d_r = 13.6$ (см. рис. 6), а в ячейке Туре 2 длина жизни вихря составляет $L/d_r = 7.5$, что свидетельствует о более симметричном образовании вихревого течения потока, чем в ячейке базовой конструкции (в аналогичной ячейке Туре 2 вихрь отсутствовал);

в ячейке Туре 1 в нижнем зазоре меняется направление течения потока на обратное на расстоянии $L/d_r = 13.6$ (рис. 6, б и 7, а), а в правом зазоре, смежном с ячейкой Туре 2, направление течения меняется на расстоянии $L/d_r = 7.5$. В левом

зазоре ячейки Туре 1 межъячейковое перетекание происходит очень интенсивно, на расстоянии $L/d_r = 25$ за решеткой тангенциальная скорость составляет 0.2;

в ячейке Туре 2 в верхнем зазоре межъячейковое перетекание потока теряет свою интенсивность на расстоянии $L/d_r = 16.2$. В верхнем зазоре ячейки Туре 1 и в правом зазоре ячейки Туре 2 межъячейковое перетекание довольно интенсивное; на расстоянии $L/d_r = 25$ за решеткой тангенциальная скорость составляет 0.2.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ПДР

Оценка эффективности использования конструкций перемешивающих дистанционирующих решеток производится на основе анализа коэффициентов внутриячейкового вихреобразования F_{vor_mom} и межъячейкового перетекания F_m , которые усреднялись по зазорам и центральным диагоналям каждой характерной ячейки, далее строились графики зависимости данных коэффициентов относительно безразмерной координаты L/d_r и проводилось их сравнение (рис. 8).

На основе результатов расчета коэффициентов F_m и F_{vor_mom} можно заключить, что для решетки альтернативной конструкции в ячейках Туре 1 и Туре 2 коэффициент F_m увеличился в 1.25 и 1.07 раза соответственно по сравнению с базовой конструкцией, а коэффициент внутриячейкового вихреобразования F_{vor_mom} увеличился в 1.4 и

Усредненные значения F_m и F_{vor_mom} в решетках базовой и альтернативной конструкций

Показатель	Ячейка Type 1		Ячейка Type 2	
	базовая конструкция (Б)	альтернативная конструкция (А)	базовая конструкция (Б)	альтернативная конструкция (А)
Коэффициент межъячейкового перетекания F_m	0.16	0.20	0.15	0.16
Отношение $\frac{F_m(A)}{F_m(B)}$	1.25		1.07	
Коэффициент внутриячейкового вихреобразования F_{vor_mom}	0.09	0.11	0.02	0.06
Отношение $\frac{F_{vor_mom}(A)}{F_{vor_mom}(B)}$	1.4		3	

3.0 раза для ячеек обоих типов по сравнению с базовой решеткой соответственно (см. таблицу).

ВЫВОДЫ

1. Анализ результатов экспериментальных исследований течения теплоносителя за решетками-интенсификаторами показал, что изменение формы и взаимного расположения дефлекторов привело к симметричному и более интенсивному образованию вихревой структуры в ячейках обоих типов в области НК по сравнению с базовой конструкцией, а также позволило увеличить интенсивность межъячейкового перетекания, что приводит к увеличению среднего значения относительных тангенциальных скоростей в зазорах до 0.2.

2. Использование альтернативной конструкции решетки в целях увеличения интенсивности перемешивания потока теплоносителя в каналах ТВС является более предпочтительным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах / С.М. Дмитриев, О.А. Бых, Ю.К. Панов, Н.М. Сорокин, Д.Л. Зверев, В.А. Фафонов. М.: Машиностроение, 2013.
- Митрофанова О.В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. М.: Физматлит, 2010.
- Гухман А.А. Введение в теорию подобия. М.: Высшая школа, 1973.
- Trupp A.C., Azad R.S. The structure of turbulent flow in triangular array rod bundles // Nucl. Eng. Des. 1975. V. 32. Is. 1. P. 47–84. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(75\)90090-4](https://doi.org/10.1016/0029-5493(75)90090-4)
- Vonka V. Measurement of secondary flow vortices in a rod bundle // Nucl. Eng. Des. 1988. V. 106. Is. 2. P. 191–207. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(88\)90277-4](https://doi.org/10.1016/0029-5493(88)90277-4)
- Eifler W., Nijssing R. Experimental investigation of velocity distribution and flow resistance in a triangular array of parallel rods // Nucl. Eng. Des. 1967. V. 5. Is. 1. P. 22–42. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(67\)90075-1](https://doi.org/10.1016/0029-5493(67)90075-1)
- Rowe D.S., Johnson B.M., Knudsen J.G. Implications concerning rod bundle crossflow mixing based on measurements of turbulent flow structure // Int. J. Heat Mass Transfer. 1974. V. 17. Is. 3. P. 407–419. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(74\)90012-X](https://doi.org/10.1016/0017-9310(74)90012-X)
- Caraghiaur D. Experimental study and modelling of spacer grid influence on flow in nuclear fuel assemblies: Technical report. KTH Stockholm, 2009.
- Carajilescov P. Experimental and analytical study of axial turbulent flows in an interior subchannel of a bare rod bundle: PhD thesis. Massachusetts Institute of Technology, 1976.
- Large eddy simulations of turbulent flow for grid-to-rod fretting in nuclear reactors / J. Bakosi, M.A. Christon, R.B. Lowrie, L.A. Pritchett-Sheats, R.R. Nourgaliev // Nucl. Eng. Des. 2013. V. 262. P. 544–561. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.06.007>
- Peña-Monferrer C., Muñoz-Cobo J.L., Chiva S. CFD turbulence study of PWR spacer-grids in a rod bundle // Sci. Technol. Nucl. Install. 2014. V. 2014. P. 15. <https://www.hindawi.com/journals/stni/2014/635651/>
- Sergeev D.A., Kandaurov A.A., Troitskaya Yu.I. The particular use of PIV methods for the modeling of heat and hydrophysical processes in the nuclear power plants // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 891. P. 012088. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012088>
- Гидродинамические особенности течения теплоносителя за перемешивающей дистанционирующей решеткой ТВС-КВАДРАТ реактора PWR / О.Б. Самойлов, А.С. Носков, Д.Л. Шипов, С.М. Дмитриев, А.А. Добров, Д.В. Доронков, М.А. Легчанов, А.Н. Пронин, Д.Н. Солнцев, В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов // Теплоэнергетика. 2019. № 4. С. 32–38. <https://doi.org/10.1134/S0040363619040076>
- Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в ТВС-Квадрат реакторов PWR с перемешивающими решетками / С.М. Дмитриев, О.Б. Самойлов, А.Е. Хробостов, А.В. Варенцов, А.А. Добров, Д.В. Доронков, В.Д. Сорокин // Теплоэнергетика. 2014. № 8. С. 20–27. <https://doi.org/10.1134/S0040363614080050>
- Экспериментальные исследования локального массообмена и эффективности перемешивания теп-

- лоносителя дистанционирующими решетками в ТВС реактора КЛТ-40С / А.В. Варенцов, Д.В. Доронков, Е.С. Купричева, Д.Н. Солнцев, В.Д. Сорокин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012. № 1. С. 107–113.
16. **Исследования** локальной гидродинамики и межъячеечного массообмена потока теплоносителя в районе направляющих каналов тепловыделяющих сборок реакторов PWR / С.М. Дмитриев, М.А. Легчанов, А.Е. Хробостов, А.В. Варенцов, Д.В. Доронков, А.А. Добров // Промышленная энергетика. 2013. № 12. С. 45–50.
 17. **Особенности** течения теплоносителя в ТВС-КВАДРАТ реактора PWR при постановке перемешивающих дистанционирующих решеток с различными типами дефлекторов / А.В. Варенцов, Д.В. Доронков, Е.М. Илютина, И.В. Каратушина, В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2015. № 3. С. 134–143.
 18. **Исследование** массообмена теплоносителя за перемешивающими решетками ТВС реакторов ВБЭР-300 с целью обоснования их эффективности / С.М. Дмитриев, А.В. Варенцов, А.А. Добров, Д.В. Доронков, М.А. Легчанов, А.Е. Хробостов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 5. С. 197–205.
 19. **Исследования** гидродинамических характеристик и особенностей течения теплоносителя за дистанционирующей решеткой тепловыделяющей сборки реактора плавучего энергоблока / С.М. Дмитриев, Д.В. Доронков, М.А. Легчанов, А.Н. Пронин, Д.Н. Солнцев, В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23. № 3. С. 385–394.
 20. **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 // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25. № 5. С. 725–734.
 21. **Применение** многоканального пневмометрического зонда для исследования профиля скорости теплоносителя в моделях топливных кассет ядерных реакторов / С.М. Дмитриев, А.А. Добров, М.А. Легчанов, А.Е. Хробостов // Приборы и методы измерений. 2015. Т. 6. № 2. С. 188–195.

Studying the Swirl Flow Hydrodynamics in the Guiding Channel Area Downstream of Mixing Spacer Grids of a PWR Reactor Fuel Assembly

S. M. Dmitriev^a, A. V. Gerasimov^{a,*}, A. A. Dobrov^a, D. V. Doronkov^a, A. P. Zhivoderov^a, E. V. Rubtsova^a, A. V. Ryazanov^a, D. N. Solntsev^a, A. N. Pronin^a, and A. E. Khrobostov^a

^aAlekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, 603155 Russia

*e-mail: poorvenom@yandex.ru

Abstract—The results from studying the coolant flow in fuel assemblies downstream of mixing spacer grids of a PWR reactor are presented. The aim of the study is to estimate the effect from using different designs of mixing grids. For this purpose, experimental investigations were carried out on an aerodynamic test facility with scaled models of fuel assembly fragments containing mixing spacer grids of different designs. Two adjacent cells of the guiding channel zone were selected as the representative study area. The specific structural feature of these cells is that the turbulizers installed on the intensifying grids have different spatial orientation. The general flow pattern is represented by the vector fields of tangential velocities and by the distribution of relative velocities in the gaps between the fuel rods and the guiding channel. For estimating the effect from using the grid designs with respect to coolant flow mixing, the intracell vortex formation coefficients and intercell mixing coefficients were analyzed. It has been shown from the performed analysis that, owing to the use of the alternative design with a pair of cell deflectors oriented in a changed direction, the intercell transfer coefficient and the intracell vortex formation coefficient were increased by a factor of 1.13 and 2.2, respectively, in comparison with those in the basic design. Hence, the use of the grid of the alternative design is more preferable for obtaining better mixing of the coolant flow. The accumulated database on coolant flow in the Square FA serves for engineering substantiation of the PWR reactor cores. The results from experimental studies are used for verification of CFD codes developed both in Russia and abroad and of programs for detailed cell-wise analysis of the cores for reducing the conservatism in substantiating their thermal reliability.

Keywords: mixing grids, deflectors, guiding channel, aerodynamic test facility, intracell vortex formation, intercell mixing