

УДК 621.039

## **Исследования гидродинамики теплоносителя в области направляющего канала тепловыделяющей сборки с решетками-интенсификаторами\***

**С.М. Дмитриев, А.А. Добров, Д.В. Доронков, Д.С. Доронкова,  
А.Н. Пронин, Е.В. Рубцова, А.В. Рязанов, Д.Н. Солнцев, А.Е. Хробостов**

*Нижегородский государственный технический университет  
им. П.Е. Алексеева*

E-mail: nevid000@mail.ru

В статье приведены результаты исследований течения теплоносителя в тепловыделяющих сборках за решетками-интенсификаторами ТВС-Квадрат реакторов типа PWR. Целью работы является оценка эффективности применения различных конструкций решеток-интенсификаторов с точки зрения перемешивания потока. Для достижения поставленной цели проведен ряд экспериментальных исследований на аэродинамическом стенде с масштабными моделями фрагментов топливных кассет с решетками-интенсификаторами различных конструкций. В качестве показательной области исследований были выбраны смежные ячейки направляющего канала, конструктивными особенностями которых является различная пространственная ориентация турбулизаторов, установленных на решетках-интенсификаторах. Общая картина течения представлена векторными полями тангенциальных скоростей, а также графическими зависимостями распределения поперечных скоростей в зазорах между стержнями области исследований. Для оценки эффективности применения конструкций решеток-интенсификаторов с точки зрения перемешивания потока теплоносителя был проведен анализ параметров внутриячейкового вихреобразования и межячейкового перемешивания. Анализ пространственного распределения тангенциальных скоростей потока позволил изучить и детализировать картину течения теплоносителя за перемешивающими решетками с различными вариантами конструкции дефлекторов. Накопленная база данных по течению теплоносителя в ТВС-Квадрат является основой 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 с целью уменьшения консерватизма при обосновании теплотехнической надежности.

**Ключевые слова:** ядерный реактор, активная зона, тепловыделяющая сборка, решетка-интенсификатор, направляющий канал, гидродинамика теплоносителя.

### **Введение**

ТВС-Квадрат — проект российской тепловыделяющей сборки, разработанный компанией АО «ТВЭЛ» для активных зон реакторов PWR с целью увеличения доли присутствия отечественных технологий на рынке ядерного топлива. Главным конструктором топливной сборки является АО «ОКБМ Африкантов» (г. Нижний Новгород, Россия). Для ТВС-Квадрат на основе исследовательских работ по обоснованию работоспособности, а также опыта конструирования и эксплуатации топливныхборок [1] был

---

\* В работе использовалась методика расчета векторных полей тангенциальных скоростей, разработанная за счет средств гранта РФФИ (проект № 18-19-00473).

© Дмитриев С.М., Добров А.А., Доронков Д.В., Доронкова Д.С., Пронин А.Н., Рубцова Е.В., Рязанов А.В., Солнцев Д.Н., Хробостов А.Е., 2020

предложен ряд конструкций решеток-интенсификаторов, особенность которых заключается в установке турбулизаторов потока — дефлекторов — различной геометрии и пространственной ориентации, функция которых заключается в создании интенсивной вихревой структуры внутри ячейки и межканального перетекания теплоносителя в твэльном пучке. Указанные процессы являются важными факторами, и их необходимо учитывать при конструировании турбулизаторов потока, а также при оценке эффективности использования данных элементов с точки зрения перемешивания теплоносителя. Они способствуют интенсификации процесса конвективного теплообмена на поверхности тепловыделяющих элементов и увеличению поперечного межъячейкового перетекания, позволяющего выровнять неоднородность поля температур в поперечном сечении топливной сборки, что способствует увеличению коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи [2–4].

Влияние геометрии дефлекторов, пластин и дистанционирующих элементов на явления перемешивания потока и вихреобразования в пучках твэл недостаточно изученно, 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 [5–11].

Для выявления основных закономерностей движения теплоносителя за перемешивающими решетками применяют подходы, основанные на изучении поперечного массообмена с использованием трассерных методов и лазерной доплеровской техники, а также на измерении распределения температурных полей в потоке теплоносителя [12–14]. В указанных работах проводилось исследование течения теплоносителя в каналах тепловыделяющей сборки (ТВС) за перемешивающей дистанцирующей решеткой (ПДР), представленными только регулярными ячейками, образованными взаимным расположением твэл.

Настоящая работа посвящена исследованию локальной гидродинамики потока области направляющих каналов (НК). Проблема увеличения коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи в районе направляющего канала стоит наиболее остро, а ячейки данной области имеют в поперечном сечении отличную от регулярных ячеек асимметричную геометрию и характеризуются значительным затеснением проходного сечения, вследствие чего условия движения потока в них сильно отличаются от условий течения в регулярных ячейках. Таким образом, исследование гидродинамики теплоносителя в ячейках области направляющего канала за различными типами турбулизаторов потока является актуальной задачей, которую необходимо решать при обосновании теплотехнической надежности активных зон.

### **Исследовательский стенд и методика измерений**

Моделирование течения теплоносителя за решетками-интенсификаторами осуществлялось на аэродинамическом стенде, представляющем собой разомкнутый контур, в котором рабочей средой является воздух [15–19]. Основные рабочие параметры исследовательского стенда: рабочая среда — воздух, производительность вентилятора высокого давления — 18540 м<sup>3</sup>/час, полное давление — 5 КПа, температурный диапазон воздушного потока: 20÷25 °С.

Для изучения процессов течения потока теплоносителя была изготовлена экспериментальная модель, представляющая собой канал квадратного сечения, в котором размещалась исследуемая часть решетки-интенсификатора в пучке твэлов-имитаторов (рис. 1). Моделируемые решетки-интенсификаторы состояли из взаимно перпендикулярных пластин, верхние кромки которых в местах их пересечения были снабжены дефлекторами. Все компоненты модели пропорционально увеличивались на коэффициент геометрического подобия  $K_r = 4,2$ . Расход воздуха через модель поддерживался с помощью вентилятора высокого давления, а для уменьшения пульсационной составляющей скорости

Рис. 1. Вид экспериментальной модели.

и длины стабилизации потока в пучке стержней перед входом в модель использовалась ресиверная ёмкость и специальный участок стабилизации потока.

На экспериментальном стенде для изучения гидродинамики потока применялись два средства измерения. Первое — пятиканальный пневмометрический зонд [20]. Датчик выполнен в виде пяти капилляров, заключенных в державку, и предназначен для измерения поля давлений. Капилляры срезаются под углом к набегающему потоку.

Измеренное поле давлений потока согласно зависимостям, полученным при тарировке зонда, пересчитывалось в направление и величину скорости. Погрешность определения составляющих вектора скорости не превышает 7 %. Ко второму относятся преобразователи давления САПФИР-22Р. Они использовались для получения показаний с пятиканального зонда. Допускаемый предел основной погрешности приборов составляет  $\pm 0,25\%$ .

Экспериментальные данные собирались с помощью блока коммутации на персональном компьютере, где производилась их дальнейшая обработка. В работе рассмотрено пять вариантов формы дефлекторов и три схемы их позиционирования в области направляющего канала.

1. В базовой схеме используется по одному дефлектору в каждой из ячеек (рис. 2а). Дефлекторы имеют одинаковый угол отгиба относительно осевого направления движения потока, равный  $25^\circ$ , но отличаются профилем и, соответственно, площадями перекрытия проходного сечения. Профили дефлекторов представлены на рис. 2. По отношению к первоначальной конструкции (рис. 2b) площадь последующих дефлекторов (рис. 2c, 2d) увеличена на 8 % и 21 % соответственно. Линия отгиба первоначального

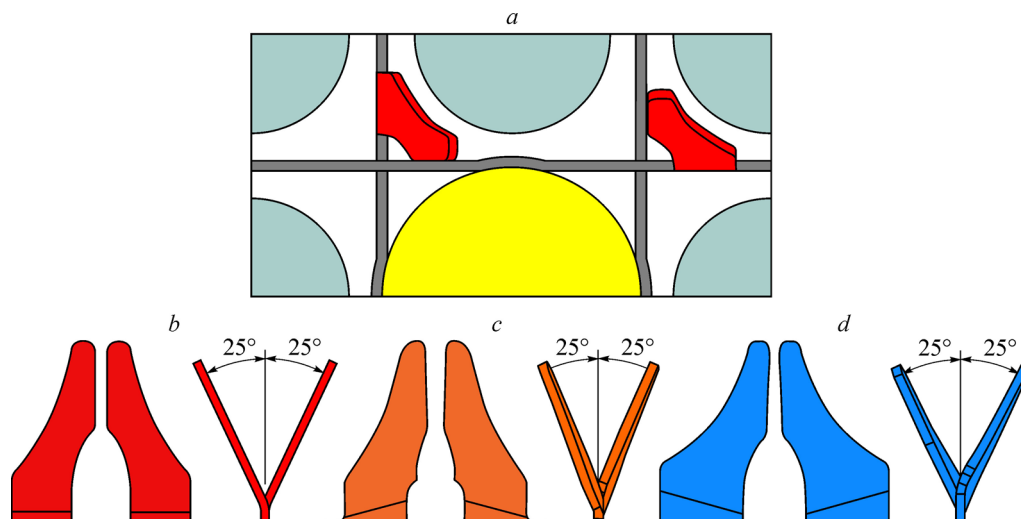


Рис. 2. Базовая схема расположения турбулизаторов.

*a* — схема ориентации дефлекторов, *b* — дефлектор первоначальной конструкции, *c* — дефлектор с увеличенной на 8 % площадью, *d* — дефлектор с увеличенной на 21 % площадью.

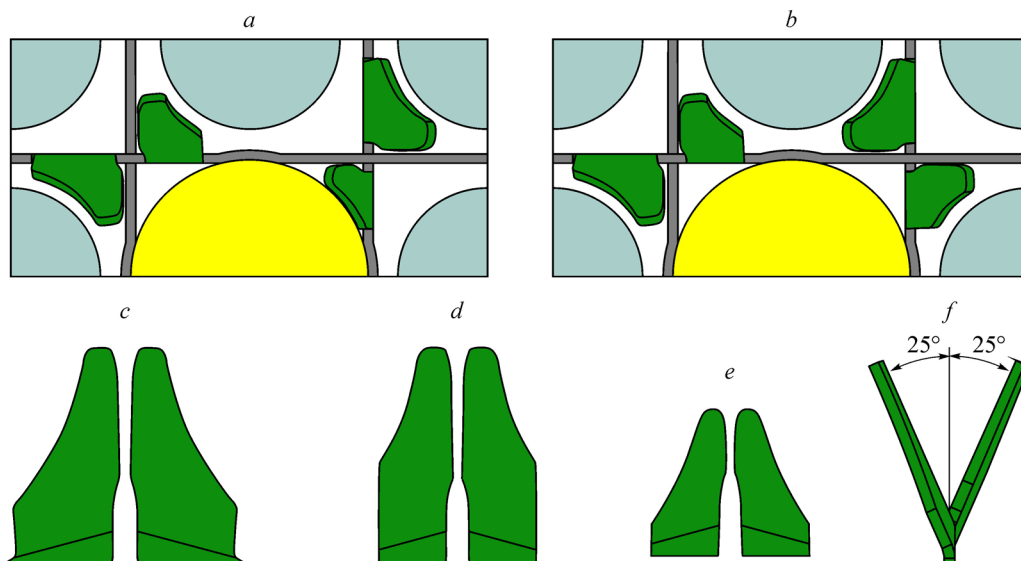


Рис. 3. Альтернативная схема с парным расположением турбулизаторов.

*a* — схема ориентации с сохранением штатного расположения,  
*b* — схема ориентации с измененным расположением, *c* — дефлектор с увеличенной на 28 % площадью,  
*d* — дополнительный дефлектор «тип 1», *e* — дополнительный дефлектор «тип 2»,  
*f* — угол отгиба дефлекторов.

варианта дефлектора параллельна кромкам пластин решетки, у двух других линия отгиба находится под углом в  $15^\circ$ .

Описываемые ниже альтернативные схемы позиционирования турбулизаторов потока отличаются количеством дефлекторов, их формой и углом отгиба.

2. Альтернативная схема с парным расположением турбулизаторов (рис. 3*a*, 3*b*) характеризуется двумя типами ориентации дефлекторов: с сохранением штатного расположения (рис. 3*a*) и с измененным расположением (рис. 3*b*). В качестве основного турбулизатора для обоих типов ориентации применяется дефлектор (рис. 3*c*) с увеличенной на 28 % относительно первоначального варианта площадью и углом отгиба, равным  $25^\circ$  (рис. 3*f*). Линия отгиба дефлектора находится под углом в  $15^\circ$  относительно кромки пластины. Дополнительные дефлекторы двух видов форм имеют идентичные основному дефлектору угол отгиба и наклон линии отгиба, но обладают меньшей площадью (рис. 3*d*, 3*e*).

3. Для альтернативной схемы с тремя турбулизаторами потока характерно положение дефлекторов, представленное на рис. 4*a*. Площадь основного дефлектора (рис. 4*b*) на 25 % больше площади первоначального варианта. Угол отгиба всех типов дефлекторов, применяемых в данной схеме, равен  $30^\circ$ , угол наклона линии отгиба составляет  $10^\circ$ . Описанная схема характеризуется применением двух типов дополнительных дефлекторов, представленных на рис. 4*c*, 4*d*.

Для построения векторного поля потока за различными решетками-интенсификаторами были выбраны две смежные ячейки области направляющего канала (рис. 5). Далее поперечное сечение характерных ячеек разбивалось на определенное количество зон, в каждой из которых с помощью пятиканального зонда измерялось поле давлений потока в различных сечениях по длине модели (рис. 6). Полученное распределение давлений затем пересчитывалось в проекции абсолютной скорости  $W$  на координатные оси  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и далее в соответствии с типом дефлектора строились индивидуальные картограммы и графики распределения поперечных скоростей в характерных сечениях по длине исследуемого участка.

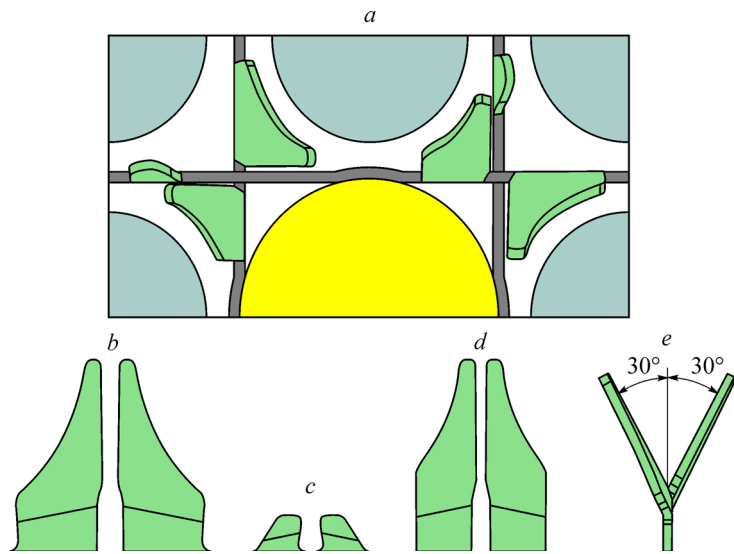


Рис. 4. Альтернативная схема с тремя турбулизаторами.  
 а — схема ориентации дефлекторов, б — дефлектор с увеличенной на 25 % площадью, с — малый дополнительный дефлектор, д — дополнительный дефлектор «тип 3», е — угол отгиба дефлекторов.

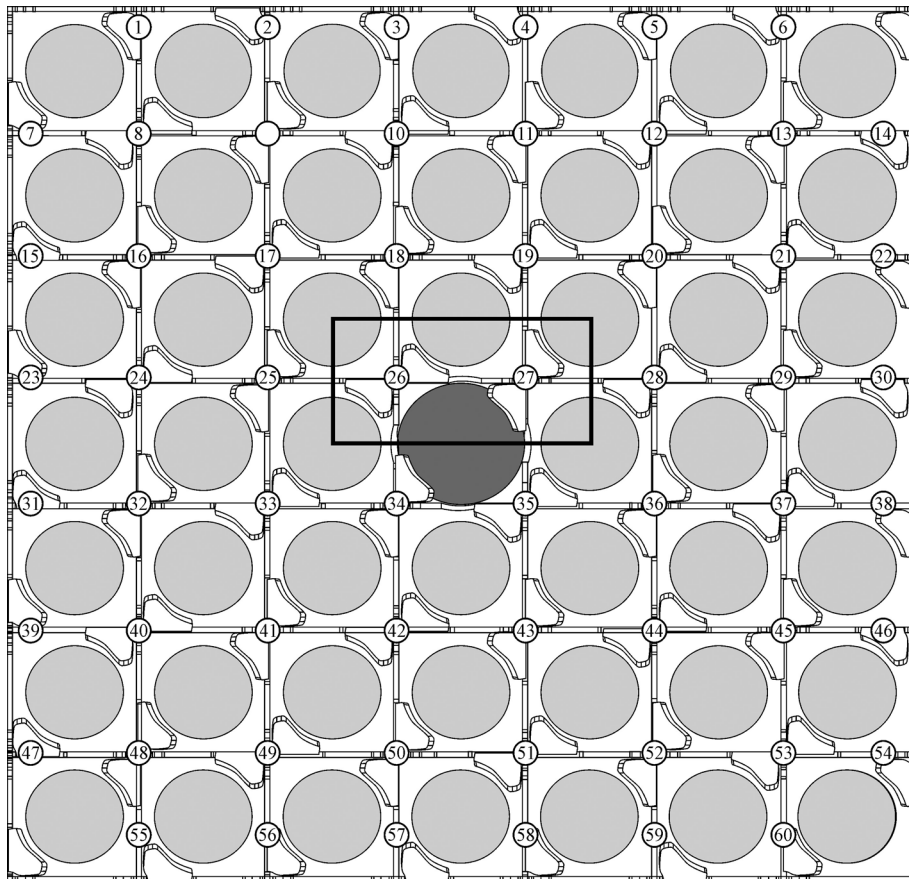


Рис. 5. Поперечное сечение модели.

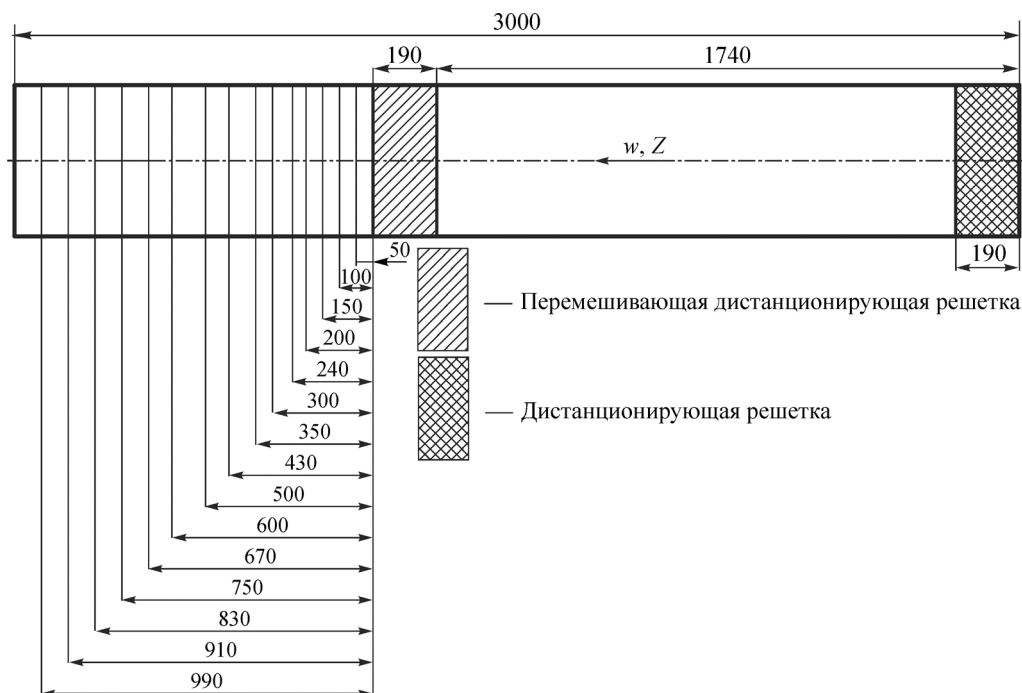


Рис. 6. Расположения сечений измерения гидродинамических характеристик потока по длине модели.

Исследования гидродинамики теплоносителя в экспериментальной модели проводились в зоне автомодельного течения потока. Таким образом, полученные результаты экспериментов могут быть перенесены на штатные условия течения теплоносителя в активной зоне реактора [21]. Обоснование представительности экспериментального исследования течения потока за решетками-интенсификаторами было представлено в работах [22–24].

Также на аэродинамическом стенде был экспериментально определен коэффициент гидравлического сопротивления (КГС) решеток-интенсификаторов с различными типами турбулизаторов потока. Проведение этих работ обусловлено тем, что для обоснования представительности экспериментальных исследований требуется соблюдение равенства КГС натуральных решеток и решеток модели. Анализ результатов исследований показал, что полученные значения КГС решеток-интенсификаторов модели соответствуют значениям гидравлического сопротивления штатных решеток при одинаковых числах Рейнольдса. Значения коэффициентов гидравлического сопротивления решеток-интенсификаторов представлены в таблице.

Экспериментальные исследования включали в себя следующие этапы.

1. Исследования локальной гидродинамики потока за решетками-интенсификаторами с несколькими схемами расположения и различными формами профиля дефлекторов.

**Таблица**  
**Коэффициенты гидравлического сопротивления**  
**решеток-интенсификаторов с различными типами турбулизаторов потока**

| Тип дефлектора  | КГС решетки |
|---|-------------|
| Дефлектор первоначальной конструкции  | 0,95        |
| Дефлектор с увеличенной на 8 % площадью                                     | 1,01        |
| Дефлектор с увеличенной на 21 % площадью                                    | 1,03        |
| дефлектор с увеличенной на 28 % площадью                                    | 1,07        |
| Дефлектор с увеличенной на 25 % площадью и малым дополнительным дефлектором | 1,27        |

Рис. 7. Векторное поле потока при  $L/d_t \approx 2,5$  за решеткой.

*a* — дефлектор первоначальной конструкции,  
*b* — дефлектор с увеличенной на 8 % площадью,  
*c* — дефлектор с увеличенной на 21 % площадью.

2. Выбор оптимальной схемы расположения турбулизаторов с использованием интегральных параметров межъячеечного взаимодействия ( $F_{\text{mix}}$ ) и завихренности потока ( $F_{\text{vortex}}$ ) [14].

### Результаты исследований гидродинамики теплоносителя

Результаты экспериментальных исследований гидродинамики теплоносителя в ячейках с одиночным расположением дефлекторов показали следующее.

1. За исследуемыми турбулизаторами формируются вихревое течение потока в пределах ячеек и направленное поперечное движение теплоносителя между смежными ячейками согласно ориентации дефлекторов (рис. 7).

2. На формирование вихрей значительное влияние оказывает ориентация дефлекторов, а именно: в ячейке, где дефлектор направляет поток в смежную ячейку области направляющего канала, образуется два вихря, а в ячейке, где дефлектор направляет поток в смежную с ней регулярную ячейку, образуется один вихрь (рис. 7).

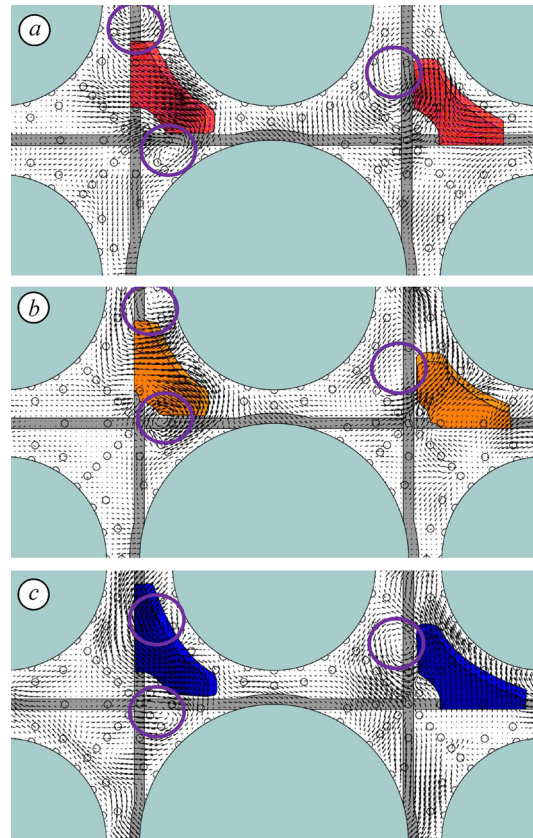
3. Движение вихрей в поперечном сечении исследуемой области также обусловлено взаимной ориентацией турбулизаторов. Вихревые структуры смещаются в сторону зазора, расположенного в направлении отгиба дефлектора. Длина жизни вихрей ограничивается расстоянием  $L/d_t \approx 2,5$  за решеткой-интенсификатором ( $L$  — расстояние от края обода решетки-интенсификатора до сечения измерения гидродинамических характеристик потока,  $d_t$  — гидравлический диаметр модели).

4. Интенсивность поперечных течений потока, характеризующаяся величиной поперечной скорости в зазорах между стержнями, зависит от ориентации турбулизаторов и слабо зависит от их профиля и площади перекрытия проходного сечения ячеек. Данное положение может быть связано с отсутствием парности дефлекторов в исследуемой области. При направлении потока дефлекторами из одной ячейки области направляющего канала в другую, поперечная скорость получается на 20 % меньше, чем в случае, когда дефлектор направляет поток в смежную с ней регулярную ячейку (рис. 8).

5. Изменение площади и формы исследуемого дефлектора оказало следующее воздействие на гидродинамические характеристики потока:

— рост величины поперечной скорости в зазорах между твэлами при увеличении площади дефлектора на 8 % оказался незначительным, а поперечная скорость, осредненная по длине исследуемого участка, не изменилась; увеличение площади дефлектора на 21 % привело к росту поперечной скорости, осредненной по длине исследуемого участка, более чем на 18 % (рис. 8);

— длина распространения возмущений потока теплоносителя за решеткой увеличилась на 40 % и составила для дефлектора первоначальной конструкции  $L/d_t \approx 10$



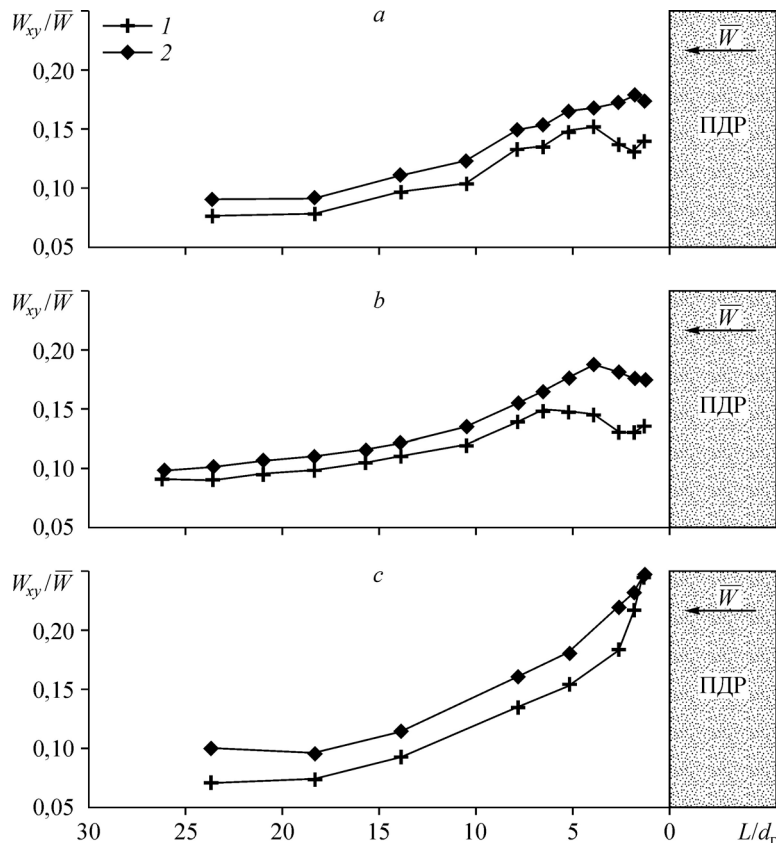


Рис. 8. Распределение поперечной скорости потока.

*a* — первоначальная конструкция дефлектора, *b* — дефлектор с увеличенной на 8 % площадью, *c* — дефлектор с увеличенной на 21 % площадью.

1 — ячейка, где дефлекторы направляют теплоноситель в аналогичные ячейки области НК, 2 — ячейка, где дефлекторы направляют поток из области НК в регулярные ячейки.

за решеткой-интенсификатором, для дефлектора с увеличенной на 8 % площадью —  $L/d_r \approx 16$ , а для дефлектора с увеличенной на 21 % площадью —  $L/d_r \approx 19$ ;

— с ростом площади дефлектора выравнивание осевого расхода теплоносителя между смежными ячейками  $G_i$ ,  $G_j$  ускоряется; для дефлектора первоначальной конструкции выравнивание расхода теплоносителя наступает на расстоянии  $L/d_r \approx 25$ , для дефлектора с увеличенной на 8 % площадью — на расстоянии  $L/d_r \approx 13$ , а для дефлектора с увеличенной на 21 % площадью — на расстоянии  $L/d_r \approx 11$  (рис. 9).

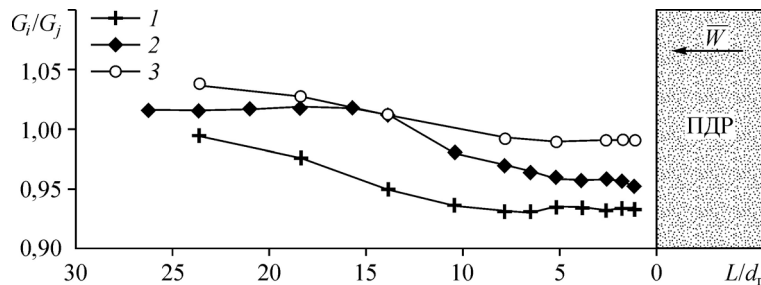


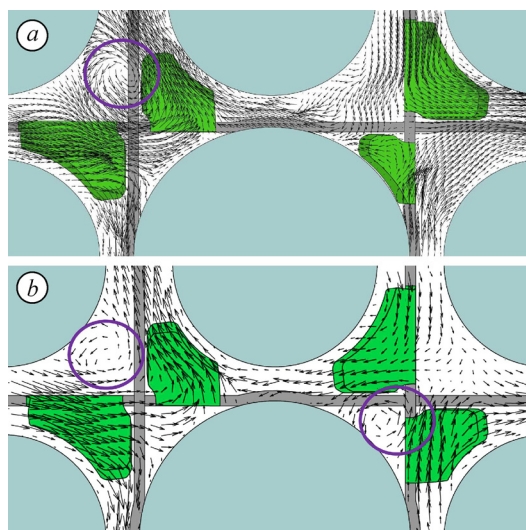
Рис. 9. Распределение осевого расхода теплоносителя между смежными ячейками исследуемой области.

Дефлектор первоначальной конструкции (1), дефлекторы с увеличенной на 8 % (2) и 21 % (3) площадью.



Рис. 10. Векторное поле потока в исследуемых ячейках при  $L/d_r \approx 2,5$  за решеткой.

*a* — схема ориентации с сохранением штатного расположения дефлекторов,  
*b* — схема ориентации с измененным положением дефлекторов.



Результаты исследований гидродинамики теплоносителя в ячейках с парным расположением турбулизаторов и различными схемами их ориентации позволяют сделать следующие выводы.

1. Вихревое движение потока наблюдается при совместной постановке дефлектора с увеличенной на 28 % площадью и дополнительного дефлектора «тип 1» (рис. 3а). Длина жизни вихря составляет более  $L/d_r \approx 25$  за решеткой. В ячейке с дополнительным дефлектором «тип 2» (рис. 3б) вихреобразование отсутствует, что можно объяснить его малой площадью и, следовательно, минимальным влиянием на течение потока (рис. 10а).

2. Применение дополнительного дефлектора «тип 1» в обеих исследуемых ячейках и изменение ориентации дефлекторов в одной из ячеек (рис. 3б) привело к значительной интенсификации процесса вихреобразования (рис. 10б):

— вихревое движение потока наблюдалось во всех исследуемых ячейках;

— длина жизни вихрей во всех исследуемых ячейках составила  $L/d_r \approx 15$  за решеткой, сокращение продолжительности вихревого движения теплоносителя явилось следствием изменения схемы ориентации дефлекторов;

— смещение вихрей в поперечном сечении исследуемой области происходит в направлении зазоров между стержнями, в которых движение теплоносителя организовано дефлектором с увеличенной на 28 % площадью.

3. Значения поперечной скорости, осредненные по всем зазорам между стержнями исследуемой области, составляют  $W_{xy}/\bar{W} \approx 0,35 \div 0,4$  непосредственно за решеткой. На расстоянии  $L/d_r \approx 25$  за решеткой значение поперечной скорости составляет  $W_{xy}/\bar{W} \approx 0,15$  (рис. 11), что говорит об увеличении более чем на 30 % длины распространения

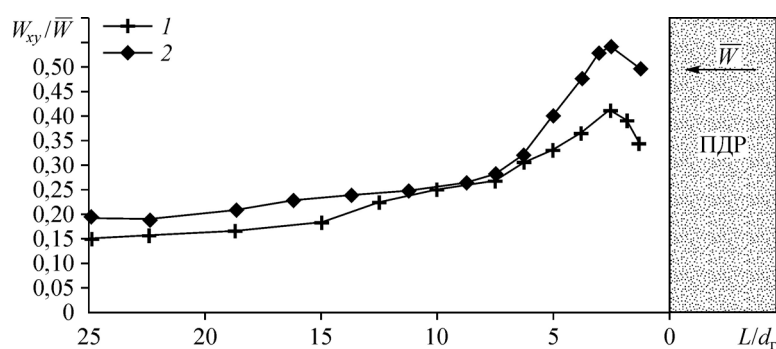


Рис. 11. Распределение относительной скорости в исследуемых ячейках при установке дефлектора с увеличенной на 28 % площадью и различными схемами ориентации турбулизаторов.

1 — ячейка области НК с сохранением штатного расположения дефлекторов,  
 2 — ячейка области НК с измененным расположением дефлекторов.

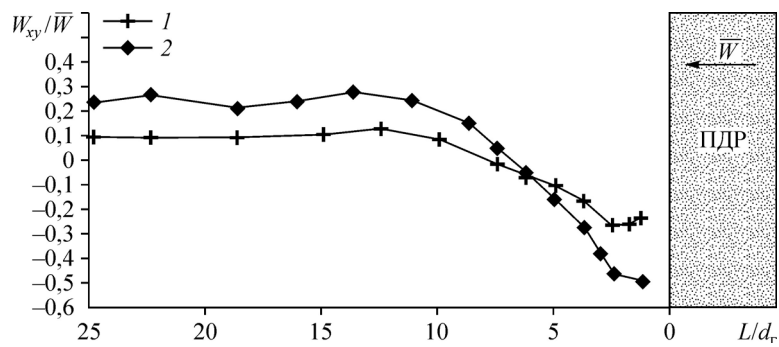


Рис. 12. Распределение поперечной скорости в зазоре между смежными ячейками при постановке дефлектора с увеличенной на 28 % площадью и различными схемами ориентации турбулизаторов.

Обозначения см. на рис. 11.

возмущений потока теплоносителя, вызванных дефлекторами, относительно варианта с отсутствием парности дефлекторов.

4. Изменение схемы ориентации турбулизаторов в области направляющего канала положительно сказалось на величине направленных турбулентных течений в зазорах между стержнями (см. рис. 3b). А именно: величина поперечной скорости потока возросла на 30 % непосредственно за решеткой, а на расстоянии  $L/d_r \approx 25$  за решеткой поперечная скорость увеличилась на 20 % относительно штатного парного расположения дефлекторов (рис. 11).

5. В зазоре между ячейками области направляющего канала поперечный поток меняет направление движения на расстоянии  $L/d_r \approx 7$  за решеткой, что можно заметить по смене знака поперечной скорости. Переориентация дефлекторов привела к росту интенсивности поперечного потока между смежными ячейками в два раза за счет того, что при изменении схемы ориентации дефлекторов движение теплоносителя в данном зазоре организуется турбулизатором значительно большей площади (рис. 12).

6. При использовании дефлектора с увеличенной на 28 % площадью выравнивание расхода теплоносителя между смежными ячейками происходит на расстоянии  $L/d_r \approx 25$  за решеткой, независимо от схемы ориентации турбулизаторов. При этом неравномерность распределения осевого расхода потока между соседними ячейками непосредственно за решеткой увеличилась в два раза: с  $5 \div 7$  % при штатном расположении дефлекторов до  $10 \div 13$  % при их измененном расположении (рис. 13).

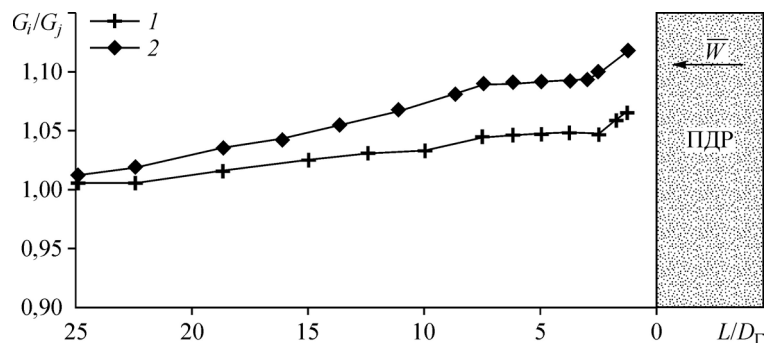


Рис. 13. Распределение осевого расхода потока в исследуемых ячейках при постановке дефлектора с увеличенной на 28 % площадью и различными схемами ориентации турбулизаторов.

Обозначения см. на рис. 11.

Рис. 14. Векторное поле потока в исследуемых ячейках с тремя турбулизаторами.

Расстояние за решетками  $L/d_r \approx 1,85$  (a), 7,91 (b), 15,82 (c).

Результаты экспериментальных исследований процесса формирования потока в ячейках области направляющего канала с тремя турбулизаторами показали следующее.

1. Вихревые структуры в ячейках возникают на расстоянии  $L/d_r = 3,5$  за решеткой, что в  $1,5 \div 2$  раза больше, чем за остальными дефлекторами. Это явление может быть обусловлено наличием третьего турбулизатора (см. рис. 14a). Вихревое течение потока сохраняется на всей длине исследуемого участка.

2. Наблюдается процесс смещения вихрей в направлении зазоров между стержнями, в которых движение потока организуется основным дефлектором (рис. 14b, 14c). Для анализа распределения поперечной скорости потока были выделены три вида зазоров между стержнями, имеющие различную ширину и организацию движения потока (рис. 15): зазоры первого вида имеют малую ширину, движение потока через них организовано основным дефлектором; зазоры второго вида имеют ширину, большую по сравнению с зазорами первого вида, движение потока через них организовано дополнительными дефлекторами; зазоры третьего вида имеют ширину, аналогичную зазорам второго вида, но при этом движение теплоносителя через них организовано основным дефлектором.

3. Наибольшая величина поперечной скорости потока локализуется в зазорах между стержнями первого вида. Она составляет  $W_i/\bar{W} \approx 0,4$  непосредственно за решеткой и  $W_i/\bar{W} \approx 0,15$  на расстоянии  $L/d_r \approx 26$  за решеткой и обусловлена рядом факторов:

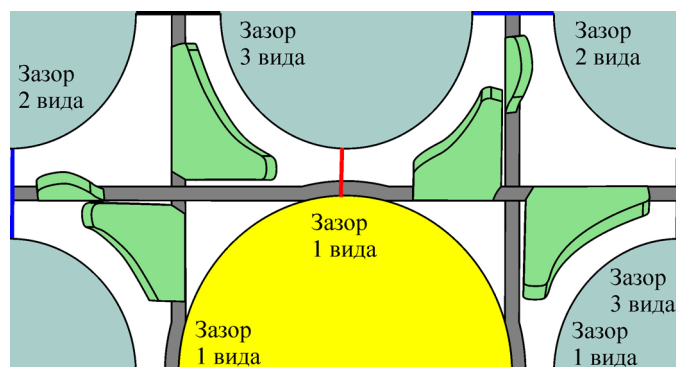
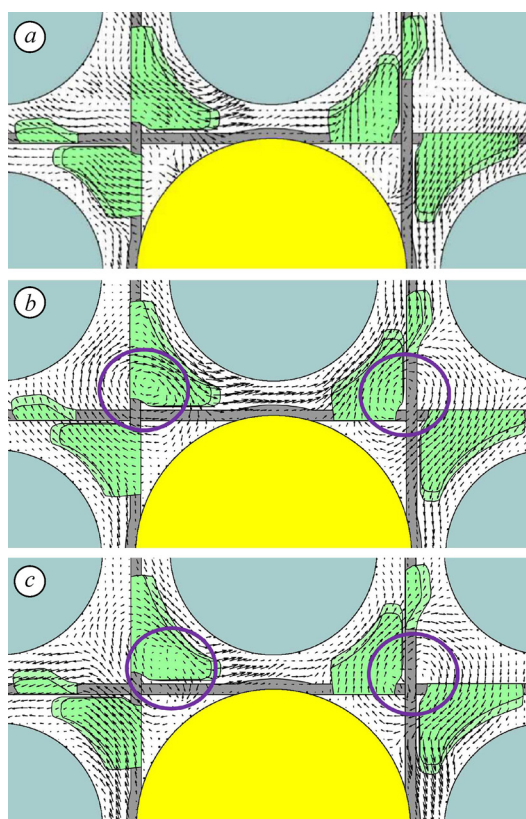


Рис. 15. Поперечное сечение области исследований с тремя выделенными типами зазоров между стержнями.

Зазоры первого (1), второго (2) и третьего (3) типов.

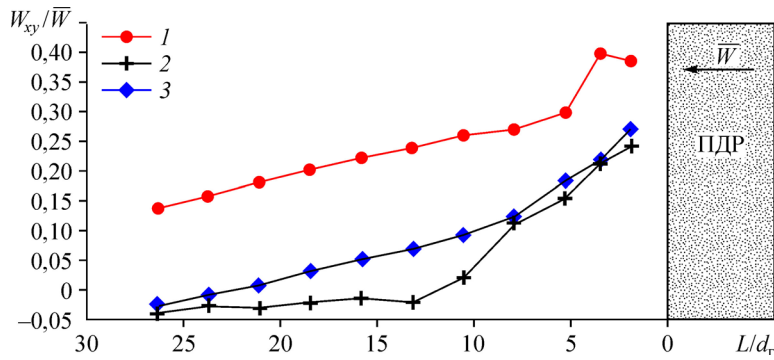


Рис. 16. Распределение поперечной скорости потока через выделенные виды зазоров между стержнями исследуемой области. Обозначения см. на рис. 15.

данные зазоры в 1,5 раза уже, чем остальные, и движение потока через них организовано основным дефлектором. Изменение направления движения поперечного потока в зазорах первого вида отсутствует (рис. 16).

4. Величина поперечной скорости в зазорах второго и третьего вида значительно меньше, чем в зазорах первого вида, и имеет значение  $W_i/\bar{W} \approx 0,25$ . Для данных зазоров характерно изменение направления движения поперечного потока, выраженное изменением знака поперечной скорости. В зазорах третьего вида поток меняет свое направление на расстоянии  $L/d_r \approx 22$  за решеткой, а в зазорах второго вида в два раза быстрее: на расстоянии  $L/d_r \approx 12$  за решеткой, что обусловлено наличием малого дополнительного дефлектора, который организует вихревое движение теплоносителя (рис. 14, 16).

5. Интенсивного перераспределения осевого расхода потока теплоносителя через ячейки исследуемой области не наблюдается. Различие осевого расхода потока через смежные ячейки составляет не более 5 %.

#### Оценка эффективности перемешивания потока в области направляющего канала решеткой-интенсификатором

Дальнейший анализ локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя, а также выявление оптимальной формы дефлектора и схемы ориентации турбулизаторов будет проводиться с использованием параметра межъячейкового обмена  $F_{\text{mix}}$ , отвечающего за поперечное движение потока между смежными ячейками, и параметра завихренности потока  $F_{\text{vortex}}$ , характеризующего турбулизацию потока внутри ячеек, а именно — интенсивность протекания процесса вихреобразования [25].

Параметр межъячейкового обмена  $F_{\text{mix}}$  определяется по формуле

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

здесь  $S$  — зазор между твэлами,  $V_{\text{cross}}$  — компонента скорости потока через границу между ячейками,  $U$  — средняя скорость теплоносителя по сечению ячейки в направлении потока.

Параметр завихренности потока определяется по формуле

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

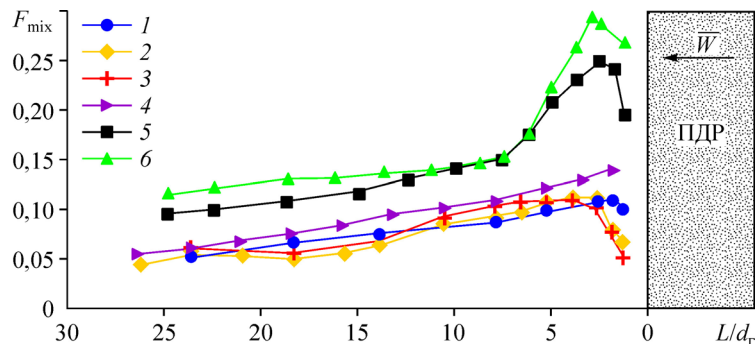


Рис. 17. Значения параметра межъячейкового обмена.

Дефлекторы с начальной конструкцией (1), с увеличенной площадью на 8 % (2), 21 % (3) и 25 % (4), с увеличенной на 28 % площадью и с сохранением штатной схемы турбулизаторов (5), с увеличенной на 28 % площадью и с измененной схемой расположения турбулизаторов (6).

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

Интенсивность межъячейкового взаимодействия при постановке одного дефлектора в исследуемые ячейки мала,  $F_{\text{mix}}$  не превышает 0,1 (рис. 17). Применение пары дефлекторов с сохранением штатного расположения повысило интенсивность протекания процесса межъячейкового обмена в 2,5 раза. При изменении схемы расположения дефлекторов интенсивность межъячейкового обмена увеличилась на 15 % относительно штатного расположения (рис. 17). Использование схемы с тремя дефлекторами снижает интенсивность межъячейкового взаимодействия теплоносителя относительно схемы с парой турбулизаторов на 50 %, что можно объяснить расположением малого дополнительного дефлектора, создающего закрутку потока, около межъячейковых зазоров (рис. 4, 17).

На графиках, представленных на рис. 18, можно видеть изменение длины жизни вихря в зависимости от схемы расположения и числа дефлекторов в ячейках. Завершение вихревого движения потока в ячейках характеризуется изменением знака параметра завихренности потока. Также на рисунке видно, что в ячейках с одним дефлектором вихревое течение потока имеет наименьшую продолжительность и прекращается на расстоянии  $L/d_r \approx 3 \div 5$  за решеткой.

Применение пары дефлекторов с сохранением штатного расположения значительно увеличивает продолжительность вихревого движения потока. При этом образование

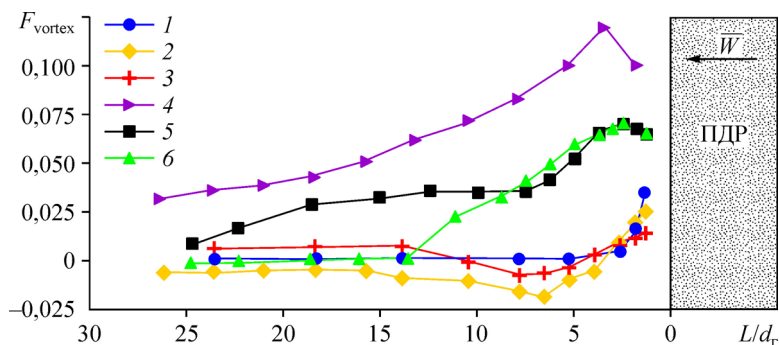


Рис. 18. Значения параметра завихренности потока.

Обозначения см. на рис. 17.

вихря, сохраняющего свою форму по всей длине исследуемого участка, происходит только в ячейках с дополнительным дефлектором «тип 1». Смена ориентации турбулизаторов позволила организовать вихревое движение теплоносителя во всех исследуемых ячейках, но при этом сократила продолжительность существования вихрей на 40 % (см. рис. 18). Здесь же видно, что применение трех турбулизаторов приводит к образованию вихрей, сохраняющих свою структуру на всей длине исследуемого участка во всех исследуемых ячейках.

### Заключение

Основываясь на вышеизложенных данных, можно заключить, что с точки зрения перемешивания потока теплоносителя в ячейках области направляющего канала наиболее предпочтительным является применение схемы с парным расположением турбулизаторов при изменении схемы их ориентации и схемы с дефлектором с увеличенной на 28 % площадью относительно дефлектора первоначальной конструкции. Такая схема является предпочтительной, что было выявлено при сравнении её с другими рассмотренными схемами. Так базовая схема с использованием одного турбулизатора обеспечивает малую интенсивность как межъячеечного взаимодействия потока, так и вихревого течения теплоносителя внутри ячеек. Длина жизни вихрей составляет  $L/d_T \approx 2,5$  за решеткой, а глубина распространения возмущений потока составляет  $L/d_T \approx 19$  за решеткой. При штатной схеме расположения пары дефлекторов вихревое течение потока организуется только в одной из исследуемых ячеек и сохраняется на расстоянии  $L/d_T \approx 25$  за решеткой. Применение схемы с тремя турбулизаторами приводит к увеличению турбулизации потока внутри ячеек, что подтверждается наличием вихрей в ячейках на расстоянии  $L/d_T \approx 27$  за решеткой, но снижению на 50 % интенсивности межъячеечного взаимодействия теплоносителя относительно схемы с парой турбулизаторов.

### 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., Баринов 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. Rogers J.T., Todreas N.E. Coolant interchannel mixing in reactor fuel rod bundles, single phase coolants. N.Y.: The American Society of Mechanical Engineers. 1968. 56 p.
6. Trupp A.C., Azad R.S. The structure of turbulent flow in triangular array rod bundles // Nuclear Engng and Design. 1975. Vol. 32. P. 47–84.
7. Vonka V. Measurement of secondary flow vortices in a rod bundle // Nuclear Engng and Design. 1988. Vol. 106. P. 191–207.
8. Eifler W., Nijssing R. Experimental investigation of velocity distribution and flow resistance in a triangular array of parallel rods // Nuclear Engng and Design. 1967. Vol. 5. P. 22–42.
9. Rowe D.S., Johnson B.M., Knudsen J.G. Implications concerning rod bundle crossflow mixing based on measurements of turbulent flow structure // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 1974. Vol. 17. P. 407–419.
10. Caraghiaur D. Experimental study and modelling of spacer grid influence on flow innuclear fuel assemblies. Technical report, KTH. Stockholm, 2009. 48 p.
11. 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. Cambridge, Ma, 1976. 98 p.
12. Bakosi J., Christon M.A., Lowrie R.B., Pritchett-Sheats L.A., Nourgaliev R.R. Large eddy simulations of turbulent flow for grid-to-rod fretting in nuclear reactors // Nuclear Engineering and Design. 2013. Vol. 262. P. 544–561.
13. Peña-Monferrer C., Muñoz-Cobo J. L., Chiva S. CFD turbulence study of PWR spacer-grids in a rod bundle // Sci. and Technology of Nuclear Installations. 2014. Vol. 1. P. 1–5.

14. **Sergeev D.A., Kandaurov A.A., Troitskaya Yu.I.** The particular use of PIV methods for the modeling of heat and hydro-physical processes in the nuclear power plants // *J. Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 891. P. 012088-1–012088-8.
15. **Дмитриев С.М., Легчанов М.А., Хробостов А.Е., Варенцов А.В., Доронков Д.В., Добров А.А.** Исследование локальной гидродинамики и межъячеечного массообмена потока теплоносителя в районе направляющего канала тепловыделяющих сборок реактора PWR // *Промышленная энергетика*. 2013. № 12. С. 45–50.
16. **Дмитриев С.М., Бородин С.С., Ершов А.Н., Легчанов М.А., Ныркв Д.А., Солнцев Д.Н., Хробостов А.Е.** Экспериментальные исследования эффективности перемешивания теплоносителя в обоснование выбора оптимальной конструкции ТВСА для внедрения в реакторы типа ВВЭР // *Изв. вузов. Ядерная энергетика*. 2009. № 1. С. 88–97.
17. **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.
18. **Дмитриев С.М., Варенцов А.В., Добров А.А., Доронков Д.В., Легчанов М.А., Хробостов А.Е.** Исследование массообмена теплоносителя за перемешивающими решетками ТВС реакторов ВВЭР-300 с целью обоснования их эффективности // *Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева*. 2013. № 5. С. 197–205.
19. **Варенцов А.В., Доронков Д.В., Илютина Е.М., Каратушина И.В., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е.** Особенности течения теплоносителя в ТВС-КВАДРАТ реактора PWR при постановке перемешивающих дистанционирующих решеток с различными типами дефлекторов // *Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева*. 2015. № 3. С. 134–143.
20. **Дмитриев С.М., Добров А.А., Легчанов М.А., Хробостов А.Е.** Применение многоканального пневмометрического зонда для исследования профиля скорости теплоносителя в моделях топливных кассет ядерных реакторов // *Приборы и методы измерений*. 2015. Т. 6, вып. 2. С. 188–195.
21. **Гухман А.А.** Введение в теорию подобия. М.: Высшая школа, 1973. 296 с.
22. **Дмитриев С.М., Доронков Д.В., Легчанов М.А., Пронин А.Н., Солнцев Д.Н., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е.** Исследования гидродинамических характеристик и особенностей течения теплоносителя за дистанционирующей решеткой тепловыделяющей сборки реактора плавучего энергоблока // *Теплофизика и аэромеханика*. 2016. Т. 23, № 3. С. 385–394.
23. **Дмитриев С.М., Добров А.А., Доронков Д.В., Пронин А.Н., Солнцев Д.Н., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е.** Изучение гидродинамических процессов течения теплоносителя в ТВС-КВАДРАТ реактора PWR с различными перемешивающими дистанционирующими решетками // *Теплофизика и аэромеханика*. 2018. Т. 25, № 5. С. 725–734.
24. **Дмитриев С.М., Герасимов А.В., Добров А.А., Доронков Д.В., Пронин А.Н., Солнцев Д.Н., Хробостов А.Е., Швецов Ю.К., Шипов Д.Л.** Гидродинамика и перемешивание теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР с тепловыделяющими сборками различных конструкций // *Теплофизика и аэромеханика*. 2019. Т. 26, № 6. С. 897–912.
25. **Митрофанова О.В.** Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. М.: Физматлит, 2010. 286 с.

*Статья поступила в редакцию 23 марта 2020 г.,  
после доработки — 19 мая 2020 г.,  
принята к публикации 26 июня 2020 г.*