

УДК 621.039

ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ЗА ПЕРЕМЕШИВАЮЩИМИ РЕШЕТКАМИ-ИНТЕНСИФИКАТОРАМИ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК РЕАКТОРА PWR

© 2022 г. С. М. Дмитриев*, А. А. Добров, Д. В. Доронков, Д. С. Доронкова,
М. А. Легчанов, А. Н. Пронин, А. В. Рязанов, А. Е. Хробостов

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

**E-mail: nevid000@mail.ru*

Поступила в редакцию 03.11.2020 г.

После доработки 12.05.2021 г.

Принята к публикации 19.05.2021 г.

В статье приведены результаты исследований течения теплоносителя за решетками-интенсификаторами тепловыделяющих сборок ТВС-Квадрат. Для оценки эффективности перемешивания теплоносителя за решетками-интенсификаторами различных конструкций и выбора их оптимальной конструкции проведен ряд экспериментов на аэродинамическом исследовательском стенде с масштабными моделями фрагментов тепловыделяющих сборок. В качестве показательной области исследований выбраны ячейки области направляющего канала. Картина течения теплоносителя представлена векторными полями тангенциальных скоростей, а также графическими зависимостями распределения поперечных скоростей. Оценка эффективности перемешивания теплоносителя решетками-интенсификаторами проводилась на основе анализа параметров внутриячейкового вихреобразования и межъячейкового перемешивания. Анализ пространственного распределения тангенциальных скоростей потока позволил изучить и детализировать картину течения теплоносителя, а также произвести оценку эффективности перемешивания потока в ТВС-Квадрат. Результаты экспериментов используются при обосновании конструкций активных зон реакторов PWR.

DOI: 10.31857/S004036442202017X

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время идет завершающий этап проектирования новой российской тепловыделяющей сборки ТВС-Квадрат для реакторов западного дизайна PWR [1]. Основываясь на исследовательских работах по обоснованию работоспособности, а также опыте конструирования и эксплуатации топливных сборок реакторов ВВЭР [2–8], для новой тепловыделяющей сборки был предложен ряд конструкций перемешивающих решеток-интенсификаторов с турбулизаторами потока – дефлекторами различной формы профиля и пространственной ориентации. Данные элементы конструкции предназначены для создания вихревого течения потока и межканального перетекания теплоносителя в твэльном пучке.

Данные процессы крайне важны, и их необходимо учитывать как при разработке формы профиля дефлекторов, так и при проектировании всех конструкций решеток-интенсификатора, а также при оценке эффективности перемешивания теплоносителя, способствующего интенсификации процесса конвективного теплообмена на поверхности твэлов и выравниванию неоднородности поля температур в поперечном сечении

тепловыделяющей сборки, что обеспечивает рост теплотехнического запаса до кризиса теплоотдачи [9].

В настоящей статье изложены результаты экспериментальных исследований гидродинамики теплоносителя в области направляющего канала (НК). Проведение экспериментальных работ в данной области твэльного пучка тепловыделяющей сборки обусловлено наиболее острой проблемой увеличения запаса до кризиса теплоотдачи в области НК, поскольку ячейки данной области имеют в поперечном сечении отличную от регулярных ячеек ассиметричную геометрию, характеризуются значительным затеснением проходного сечения и, как следствие, условия течения теплоносителя в них сильно отличаются.

Таким образом, исследование гидродинамики теплоносителя в области НК с дефлекторами различной формы профиля и определение эффективности перемешивания теплоносителя турбулизаторами являются актуальной задачей, решение которой необходимо при обосновании теплотехнической надежности активных зон ядерных реакторов [9].

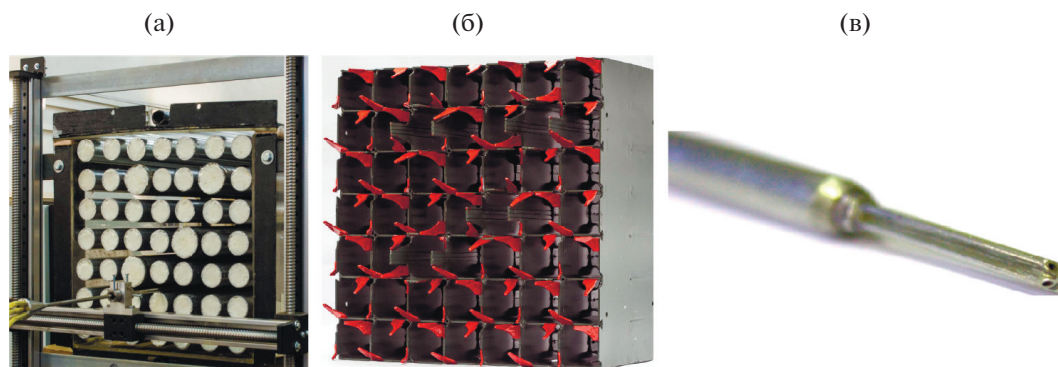


Рис. 1. Экспериментальная модель и измерительное оборудование: (а) — выходная часть экспериментальной модели, (б) — перемешивающая решетка-интенсификатор, (в) — пятиканальный пневмометрический датчик.

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ СТЕНД И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Аэродинамический исследовательский стенд [10–13] представляет собой разомкнутый контур, в котором течение водяного теплоносителя в твэльном пучке ТВС-Квадрат моделируется потоком воздуха на основе теории подобия [14].

Основные рабочие параметры исследовательского стенда:

- а) рабочая среда — воздух;
- б) производительность вентилятора — $18540 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- в) полное давление в ресиверной емкости — 6 КПа;
- г) температурный диапазон воздушного потока — $20\text{--}25^\circ\text{C}$.

Для изучения гидродинамики теплоносителя изготовлена экспериментальная модель, представляющая собой канал квадратного сечения, в котором поочередно размещались исследуемые решетки-интенсификаторы в пучке стержней. В поперечном сечении экспериментальная модель повторяет четвертую часть штатной тепловыделяющей сборки (рис. 1а). Модели пропорционально увеличены относительно твэльного пучка штатной ТВС-Квадрат на коэффициент геометрического подобия $K_r = 4.2$.

Решетки-интенсификаторы собраны из взаимно перпендикулярных пластин, верхние кромки которых снабжены смесительными лопатками — дефлекторами. Решетки, поочередно устанавливаемые в модель, отличаются формой профиля дефлекторов и их углами отгиба, остальные элементы решеток идентичны (рис. 1б).

Поля давлений воздушного потока за решетками-интенсификаторами измерялись пятиканальным пневмометрическим датчиком (рис. 1в). Данное измерительное устройство перед проведением экспериментов подвергалось предварительной тарировке в воздушном потоке с заранее

известной аксиальной скоростью и полным и статическим давлением в точке позиционирования прибора. Измеренное поле давлений потока в модели, согласно тарировочным зависимостям, пересчитывалось в значения компонент вектора скорости. Далее на основе локальных значений скорости определялась трехмерная картина потока в экспериментальных моделях. Поперечные и осевые скорости определялись с погрешностью, не превышающей 7%.

Для построения трехмерной картины течения теплоносителя за различными решетками-интенсификаторами выбрана показательная область НК (рис. 2а). Поперечное сечение области разбивалось на зоны, в каждой из которых измерялось поле давлений потока в характерных сечениях по длине модели за решетками, пересчитываемое затем в компоненты вектора скорости. Все измерения проводились при одном значении среднерасходной скорости воздушного потока на входе в модель. Значение скорости на входе равно 43.3 м/с , число Рейнольдса в твэльном пучке составляло 115000. Далее графические зависимости и картограммы распределения поперечных и аксиальных скоростей потока за решетками-интенсификаторами различной конструкции строились на основе безразмерных скоростей, т.е. локальное значение каждой компоненты вектора скорости нормировалось на величину среднерасходной скорости на входе в модели, что позволило соотнести результаты экспериментов, полученных за дефлекторами различной формы профиля.

Исследования гидродинамики теплоносителя в экспериментальной модели проводились в зоне автомодельного течения воздушного потока. Под зоной автомодельного течения воздушного потока подразумевается режим движения рабочей среды в канале экспериментальной модели исследовательского стенда. Данный режим характеризуется одинаковым безразмерным профилем относительной скорости потока как для водяного теплоносителя

реакторной установки, так и для воздушного потока в канале экспериментальной модели. Следовательно, результаты экспериментов могут быть перенесены на штатные условия течения теплоносителя в активной зоне ядерного реактора.

Начало зоны автомодельного течения воздушного потока определяется экспериментально:

1) на основе построения зависимости сопротивления трения пучка гладких труб от числа Рейнольдса Re ;

2) на основе построения зависимости коэффициента гидравлического сопротивления (КГС) исследуемых типов перемешивающих решеток от числа Рейнольдса.

Анализ данных двух зависимостей показывает, что, начиная с некоторого числа Рейнольдса, величины сопротивления трения пучка гладких труб и КГС исследуемых типов перемешивающих решеток перестают значительно изменяться. Описанное явление говорит о начале зоны автомодельного течения воздушного потока. При проведении экспериментов зона автомодельного течения воздушного потока начиналась в диапазоне чисел Рейнольдса от 5.5×10^4 до 6×10^4 .

В качестве характерного масштаба зоны автомодельного течения воздушного потока можно взять характерную скорость потока. При проведении экспериментов характерной скоростью являлась осевая скорость на входе в канал экспериментальной модели.

Число Рейнольдса определялось согласно формуле

$$Re = (Vd_r)/\nu,$$

где V – характерная скорость (м/с), d_r – гидравлический диаметр твэльного пучка экспериментальной модели (м), ν – кинематическая вязкость среды (м²/с).

Гидравлический диаметр d_r определялся только для пучка твэлов-имитаторов, расположенных в чехле экспериментальной модели. Локальные изменения геометрии пучка твэлов-имитаторов, обусловленные наличием перемешивающей решетки с дефлекторами, при определении гидравлического диаметра не учитывались.

Обоснование представительности экспериментов также показано в работах [15–17].

Кроме того, на исследовательском стенде был экспериментально определен коэффициент гидравлического сопротивления (КГС) решеток-интенсификаторов. Это вызвано тем, что для представительности экспериментов необходимо соблюдения равенства КГС штатных решеток и модельных. Результаты измерения КГС показали, что значения КГС решеток-интенсификаторов модели соответствуют значениям КГС штатных решеток при идентичных числах Рейнольдса.

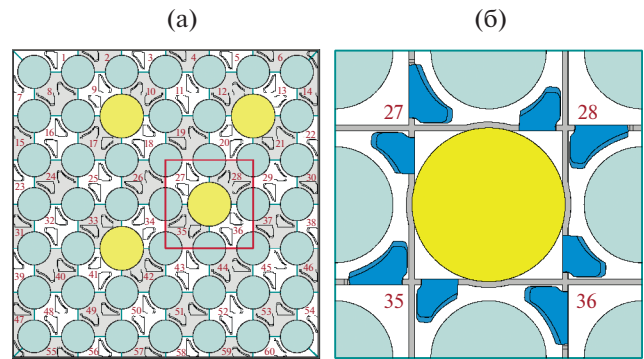


Рис. 2. Показательная область исследований: (а) – положение показательной области в поперечном сечении экспериментальной модели, (б) – ориентация дефлекторов в области исследований.

В показательной области исследований можно выделить два типа ячеек.

1. Первый тип (ячейки №№ 27, 36) характеризуется сохранением ориентации дефлекторов, которая идентична положению дефлекторов в стандартных ячейках, расположенных через один ряд твэлов от НК (рис. 2б).

2. Второй тип (ячейки №№ 28, 35), для которого характерно изменение ориентации дефлекторов, а именно изменение последовательности отгиба дефлектора относительно смежных с ней стандартных ячеек (рис. 2б).

В работе рассмотрены три варианта формы профиля дефлектора, представленных на рис. 3.

Исходная форма профиля дефлектора (рис. 3а): линия отгиба дефлектора лежит под углом в 15° относительно грани пластины решетки, угол отгиба дефлектора относительно вертикали составляет 25° , турбулизатор имеет наименьшую площадь из всех представленных.

Первая альтернативная форма профиля дефлектора (рис. 3б): площадь профиля увеличена на 6.5% относительно исходной, линия отгиба дефлектора лежит под углом в 10° относительно грани пластины решетки и поднята от кромки пластины решетки, угол отгиба дефлектора относительно вертикали составляет 30° .

Вторая альтернативная форма профиля дефлектора (рис. 3в): площадь профиля увеличена на 8.5% относительно исходной, дефлектор имеет две линии отгиба. Первая линия отгиба лежит параллельно грани пластины решетки, вторая линия отгиба расположена под углом 70° относительно горизонтали. Отгиб дефлектора по первой линии производится на 30° , а по второй – на 20° .

В каждой из ячеек исследуемой области присутствует пара дефлекторов различной формы (рис. 2б). Первый дефлектор, называемый “основной”, обладает широким основанием (рис. 3) и отогнут в направлении зазора между твэлом и

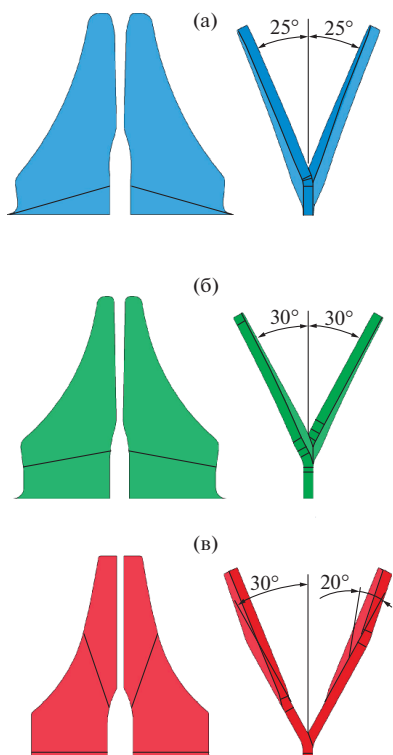


Рис. 3. Формы профилей дефлекторов: (а) — дефлектор с исходной формой профиля, (б) — первая альтернативная форма профиля дефлектора, (в) — вторая.

НК (рис. 2б). Второй дефлектор, образующий пару, имеет на 20% уменьшенную ширину основания относительно “основного” дефлектора и отгиб в направлении зазора между твэлами. Данный турбулизатор называется “дополнительным”.

Экспериментальные исследования включали в себя следующие этапы:

1) изучение особенностей формирования вихревого течения потока в ячейках показательной области за дефлекторами разной формы;

2) исследование образования поперечных течений потока между ячейками области НК за дефлекторами разной формы;

3) выбор оптимального профиля дефлектора для оценки интенсивности перемешивания потока теплоносителя при использовании таких интегральных параметров, как межячеечный обмен F_{mix} и завихренности потока F_{vor} [18].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

За каждым типом дефлектора в потоке теплоносителя возникают вихри внутри ячеек с изменяющейся топологией и различными продолжительностями жизни, а также направленные поперечные течения между соседними ячейками, которые имеют различную структуру и интенсивность (рис. 4).

За дефлекторами исходной формы профиля на расстоянии $L/d_r = 1.85$ за решеткой в ячейках с сохраненной ориентацией турбулизаторов образуются два вихря, локализованные в областях поперечного сечения ячеек, не занятых профилем лопаток (рис. 4а). Затем на расстоянии $L/d_r = 5.27$ за решеткой наблюдается процесс смещения вихрей в направлении зазоров, движение потока в которых организовано дополнительным дефлектором, на расстоянии $L/d_r = 7.91$ вихревые структуры полностью рассеиваются. В ячейках с измененной ориентацией турбулизаторов образуется один вихрь, расположенный в центре ячейки (рис. 4а), который рассеивается на различных расстояниях от решетки, а именно в ячейках №№ 28, 35 вихревое течение потока прекращается на расстояниях $L/d_r = 15.82$ и 18.46 соответственно. Смещения вихрей в направлении зазоров между твэлами в ячейках с измененной ориентацией турбулизаторов не наблюдается.

За дефлектором первой альтернативной формы профиля зарождение вихря в ячейках наступает на большем расстоянии от решетки, чем за

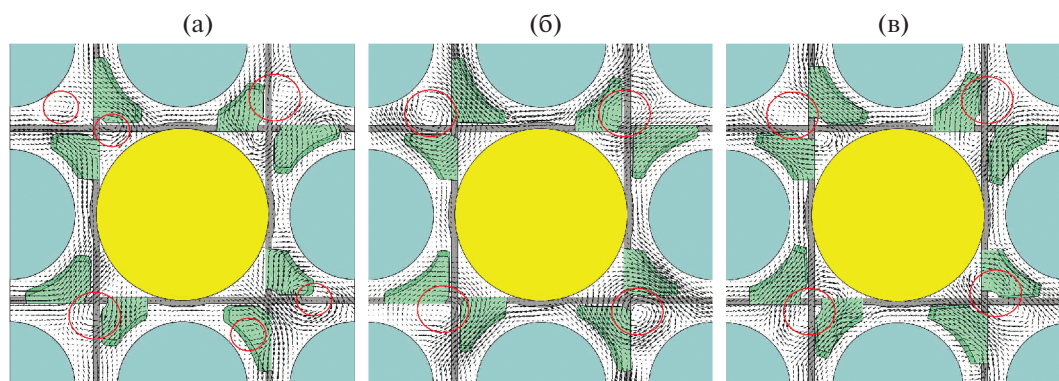


Рис. 4. Векторное поле течения потока в области НК: (а) — дефлектор с исходной формой профиля, $L/d_r = 1.85$; (б) — дефлектор первой альтернативной формы профиля, 3.43; (в) — второй альтернативной формы, 1.85.

дефлектором исходной формы, и не зависит от типа ориентации турбулизаторов в ячейках, а расстояние зарождения вихря от решетки составляет $L/d_r = 3.43$ (рис. 4б). В ячейках с сохраненным расположением дефлекторов вихрь занимает большую часть поперечного сечения и имеет круглую форму, при этом топология вихря не изменяется. Вихревая структура в ячейках данного типа наблюдается по всей длине исследуемого участка продольного сечения модели. В ячейках с измененной ориентацией турбулизаторов вихревая структура овальной формы в центре ячейки исчезает на расстоянии $L/d_r = 15.82$ от решетки.

За дефлектором второй альтернативной формы профиля зарождение вихря в ячейках наступает на том же расстоянии от решетки, что и за дефлектором исходной формы. В ячейках образуется один большой вихрь эллиптической формы, расположенный в центре (рис. 4в). Вне зависимости от схемы расположения дефлекторов вихри из центра ячейки смещаются в зазор между твэлами, движение потока в котором организуется дополнительным дефлектором, и рассеиваются на расстоянии $L/d_r = 10.55$ за решеткой.

За дефлектором второй альтернативной формы профиля во всех ячейках после рассеяния большого вихря возникают вторичные малые вихри, расположенные около стенки НК (рис. 5). В ячейках с сохраненной ориентацией дефлекторов вторичные вихри возникают на расстоянии $L/d_r = 13.19$ за решеткой. В ячейках с измененной ориентацией турбулизаторов зарождение вторичных вихрей начинается на расстоянии $L/d_r = 18.46$ за решеткой, вторичные вихри сохраняют свою структуру по всей оставшейся длине проведения измерений. В ячейках с сохраненным расположением дефлекторов вторичные вихри исчезают на различных расстояниях: в ячейке № 36 на расстоянии $L/d_r = 18.46$ за решеткой, а в № 27 на расстоянии 23.73. Различие в продолжительности жизни вторичных вихрей может быть обусловлено различной интенсивностью перестроения поперечных потоков в области исследований, а также различной ориентацией турбулизаторов в ячейках.

Непосредственно за решеткой-интенсификатором, вне зависимости от профиля дефлектора и ориентации турбулизаторов в ячейках, максимальные значения поперечной скорости локализованы в областях ячеек, лежащих за вершинами дефлекторов (рис. 6). Величина поперечной скорости составляет 0.35–0.55 от среднерасходной скорости. В сечении $L/d_r = 3.43$ за решеткой наблюдается процесс перемещения максимумов поперечной скорости из областей ячеек, расположенных на вершинах дефлекторов в зазорах между твэлами, куда направлен поперечный поток, созданный турбулизатором. Для этого процесса характерно снижение поперечной скорости до 0.4

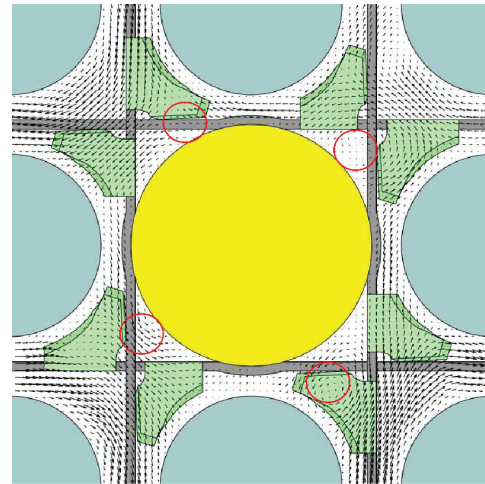


Рис. 5. Векторное поле течения потока в области НК за дефлектором второй альтернативной формы профиля в сечении $L/d_r = 18.46$ за решеткой.

от среднерасходной скорости. В сечении $L/d_r = 5.27$ максимумы поперечной скорости локализованы в самой узкой части зазора между стержнями, а поперечная скорость имеет значение 0.35 от среднерасходной.

В сечении $L/d_r = 7.91$ за всеми исследуемыми формами профилей дефлекторов наблюдается формирование устойчивых конвективных макротечений в исследуемой области, направление и интенсивность которых определяются не только формой профиля дефлекторов, но и рядом других факторов. На расстоянии $L/d_r = 10.55$ за решеткой процесс формирования конвективных потоков завершается, и далее, начиная с сечения $L/d_r = 13.19$, наблюдаются постепенное затухание поперечных течений и выраженное уменьшение тангенциальных скоростей. Направления движения конвективных течений за различными типами дефлекторов представлены на рис. 7. На формирование устойчивых конвективных макротечений оказывают влияние следующие факторы: разрушение либо сохранение поперечных потоков через зазоры между твэлами и НК, а также продолжительность существования вихрей в ячейках.

За решетками-интенсификаторами с дефлекторами исходной формы и второй альтернативной формы профилей наблюдается процесс разрушения поперечных потоков между ячейками НК, характеризующийся сменой знака поперечной скорости. За дефлектором первой альтернативной формы профиля направление поперечного течения теплоносителя в области НК не изменяется, поскольку не происходит изменения знака поперечной скорости. Сохранение устойчивых поперечных течений в области НК за дефлектором первой альтернативной формы можно

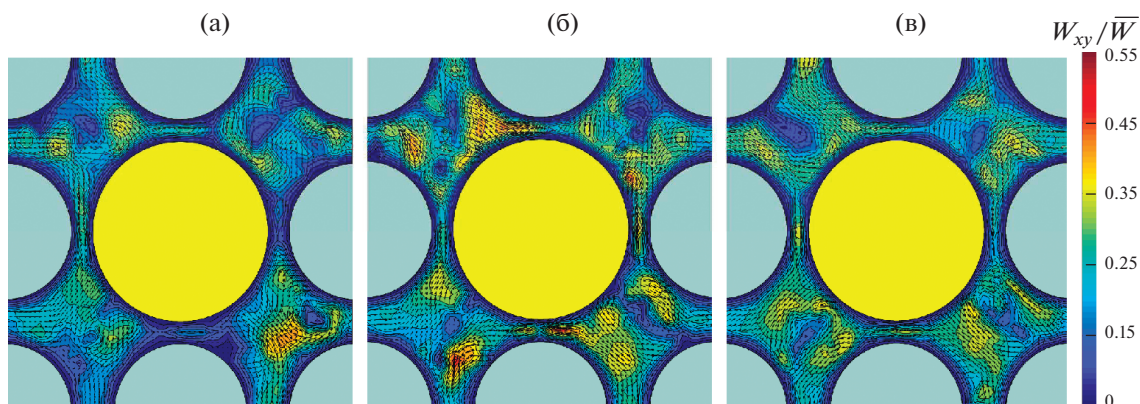


Рис. 6. Картограмма изотак поперечных скоростей области НК при $L/d_r = 1.85$: (а) – дефлектор с исходной формой профиля, (б) – дефлектор первой альтернативной формы профиля, (в) – второй формы.

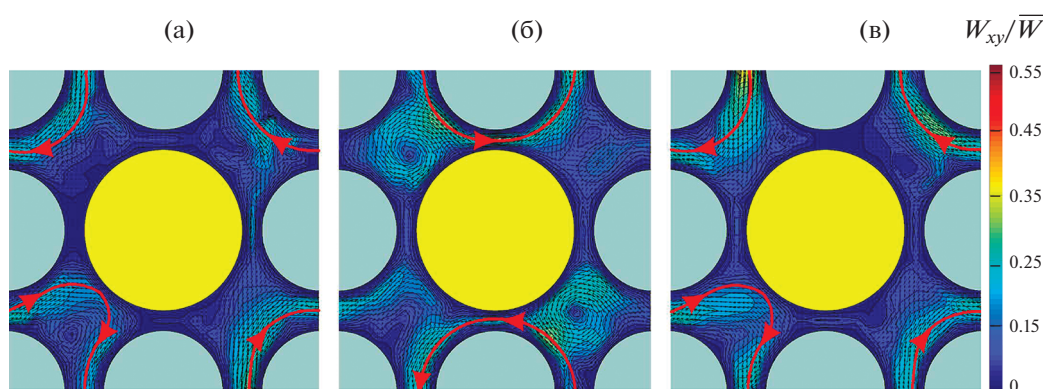


Рис. 7. Картограмма изотак поперечных скоростей в области НК при $L/d_r = 13.19$: (а) – дефлектор с исходной формой профиля, (б) – первой альтернативной формы профиля, (в) – второй формы.

объяснить наличием когерентных вихрей, сохраняющих структуру и не дающих разрушиться поперечным течениям между ячейками НК.

Таким образом, за дефлекторами исходной формы и второй альтернативной формы профилей поперечные макротечения преимущественно организованы вне области НК, а за дефлектором первой альтернативной формы профиля, наоборот, в области НК.

Наибольшие значения осевой скорости наблюдаются в областях ячеек, локализованных за вершинами профилей основных дефлекторов на расстоянии $L/d_r = 1.85$ за решеткой, величина осевой скорости составляет $(W_z/\bar{W}) = 1.3$. Вблизи поверхности стержней, расположенных в области поперечных макротечений потока, имеются зоны низкой осевой скорости $W_z/\bar{W} = 0.85-0.9$, которые локализованы возле диагоналей, проходящих через центры стержней (рис. 8). За решеткой-интенсификатором с дефлектором первой альтернативной формы профиля количество зон низкой осевой скорости меньше, чем за решеткой с дефлекторами исходной формы профиля и первой альтернативной формы.

Выравнивание неоднородности поля осевой скорости в поперечном сечении области НК происходит на разных расстояниях от решетки и зависит от конструкции дефлектора: за дефлектором исходной формы профиля аксиальные скорости выравниваются при $L/d_r \approx 20$, за дефлектором первой альтернативной формы профиля аксиальные скорости выравниваются при $L/d_r \approx 15$, за дефлектором второй альтернативной формы профиля – при $L/d_r \approx 18$.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ПОТОКА В ОБЛАСТИ НАПРАВЛЯЮЩЕГО КАНАЛА ДЕФЛЕКТОРАМИ РАЗЛИЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Эффективность перемешивания потока оценивалась с помощью параметров межъячеечного обмена F_{mix} и завихренности потока F_{vor} [18].

Параметр межъячеечного обмена F_{mix} характеризует поперечное перетекание потока в области НК и определяется по формуле

$$F_{\text{mix}} = \frac{1}{S} \int \frac{|V_{\text{cross}}|}{U} ds.$$

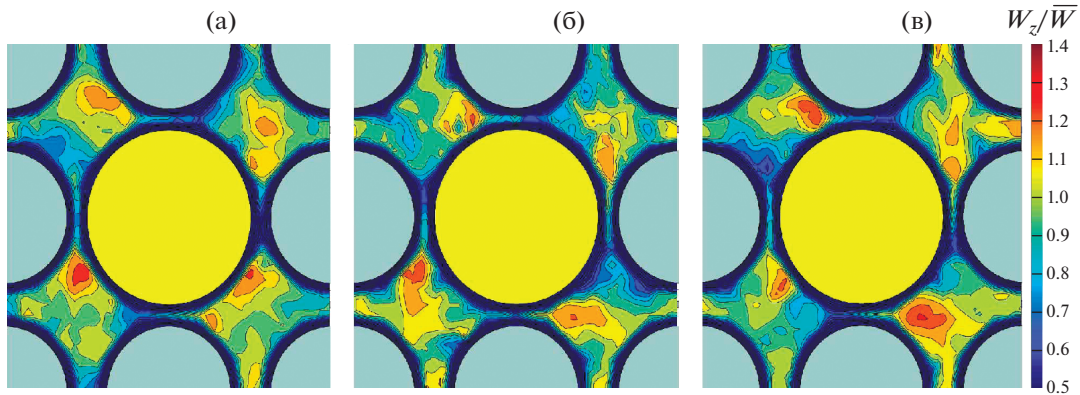


Рис. 8. Картограмма осевой скорости в области НК при $L/d_r = 1.85$: (а) – дефлектор с исходной формой профиля, (б) – первой альтернативной формы профиля, (в) – второй формы.

Здесь S – ширина зазора между твэлами, V_{cross} – компонента вектора скорости потока через зазор между твэлами, U – средняя аксиальная скорость потока в ячейке.

Параметр завихренности потока описывает интенсивность вихревого течения потока отдельно внутри каждой ячейки области исследований и определяется по формуле

$$F_{vor_mom} = \frac{\int r^2 V_{lat} U_{loc} dr}{R_S \int r U_{loc}^2 dr}.$$

Здесь V_{lat} – поперечная составляющая вектора скорости потока; U_{loc} – локальная аксиальная скорость потока в зоне измерения; r – расстояние от центра ячейки до точки, в которой измеряются поперечные скорости потока; R_S – расстояние от центра ячейки до поверхности стержня.

По результатам определения параметров можно отметить следующее. За дефлектором с первой альтернативной формой профиля параметр межъячеечного обмена больше на 20%, чем за дефлекторами с исходной формой и второй альтернатив-

ной формой профилей (рис. 9). Такое распределение значений параметра межъячеечного обмена говорит о различной организации поперечных потоков за дефлекторами разных форм. Конвективные течения теплоносителя за дефлекторами исходной формы и второй альтернативной формы профилей преимущественно организуются вне области НК. За дефлектором первой альтернативной формы профиля конвективные течения теплоносителя организуются в ячейках области НК.

Осредненный по всей области исследований параметр межъячеекового взаимодействия показывает, что интенсивность поперечного потока между ячейками имеет близкие величины для всех исследуемых форм профилей дефлекторов и составляет непосредственно за решеткой 0.18–0.23, а на расстоянии $L/d_r = 24$ за решеткой имеет значение 0.08 (рис. 9).

Осредненный по всей исследуемой области параметр завихренности потока за дефлектором первой альтернативной формы профиля имеет в 2–3 раза большую величину, чем за другими турбулизаторами (рис. 10). Данное распределение параметров говорит о большей интенсивности вихрево-

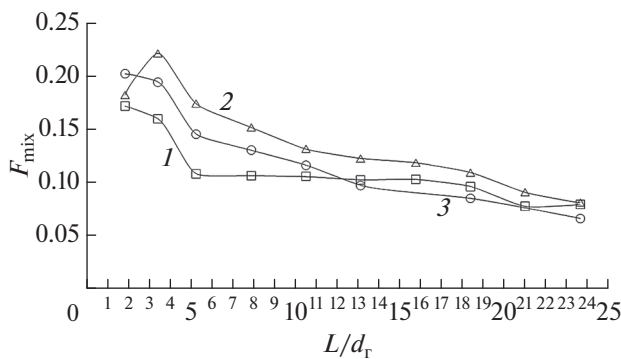


Рис. 9. График распределения параметра межъячеекового взаимодействия F_{mix} за решеткой: 1 – дефлектор с исходной формой профиля, 2 – дефлектор первой альтернативной формы профиля, 3 – второй формы.

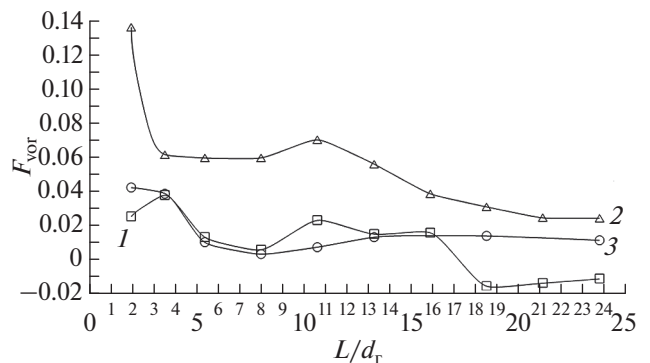


Рис. 10. График распределения параметра завихренности потока F_{vor} за решеткой: 1–3 – см. рис. 9.

го течения потока за дефлектором первой альтернативной формы, чем за другими турбулизаторами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основываясь на изложенных результатах, можно заключить, что наиболее эффективно перемешивает поток в области направляющего канала дефлектор первой альтернативной формы профиля. Данная конструкция турбулизатора создает устойчивые, крупные вихри со значительно большей продолжительностью существования за перемешивающей решеткой-интенсификатором, чем за другими дефлекторами, об этом говорит в 2–3 раза большая величина параметра завихренности потока, а конвективные поперечные макротечения за дефлектором первой альтернативной формы профиля проходят преимущественно в области направляющего канала. За другими дефлекторами поперечные макротечения локализованы преимущественно вне области направляющего канала либо на границах области.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2021-0008).

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. *Бородин С.С., Дмитриев С.М., Легчанов М.А., Хробостов А.Е., Самойлов О.Б., Сорокин Н.М.* Особенности гидродинамики теплоносителя в альтернативных ТВС реакторов ВВЭР-1000 при использовании перемешивающих решеток // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2006. № 4. С. 70.
3. *Самойлов О.Б., Куприянов А.В., Фальков А.А., Шипов Д.Л., Молодцов А.А., Лукьянов В.Е.* Экспериментальные исследования теплотехнических характеристик ТВСА с перемешивающими решетками // Атомная энергия. 2014. Т. 116. № 1. С. 11.
4. *Дмитриев С.М., Лукьянов В.Е., Самойлов О.Б.* Обоснование корреляции для расчета критического теплового потока в тепловыделяющих сборках альтернативной конструкции с перемешивающими решетками-интенсификаторами для ВВЭР-1000 // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2012. № 1. С. 99.
5. *Самойлов О.Б., Шипов Д.Л., Фальков А.А., Богряков В.Г., Сорокин Н.М., Дмитриев С.М.* Теплогидравлические и гидродинамические исследования характеристик ТВС альтернативной конструкции ВВЭР-1000 // ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов. 2004. № 2. С. 47.
6. *Самойлов О.Б., Кууль В.С., Преображенский Д.Г.* Результаты создания и развития ТВС альтернативной конструкции для реактора ВВЭР-1000 // ВАНТ. Серия: Материаловедение и новые материалы. 2005. № 1. С. 126.
7. *Самойлов О.Б., Фальков А.А., Морозкин О.Н., Лукьянов В.Е.* Уточнение методики учета отклонений локальных параметров при обосновании теплотехнической надежности активной зоны из ТВСА ВВЭР-1000 // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2010. № 4. С. 111.
8. *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. № 5. С. 252.
9. *Дмитриев С.М., Баринов А.А., Самойлов О.Б., Хробостов А.Е.* Методы обоснования теплотехнической надежности активной зоны тепловых водородных реакторов // Атомная энергия. 2016. Т. 120. № 5. С. 270.
10. *Дмитриев С.М., Легчанов М.А., Хробостов А.Е., Варенцов А.В., Доронков Д.В., Добров А.А.* Исследования локальной гидродинамики и межъячеечного массообмена потока теплоносителя в районе направляющего канала тепловыделяющих сборок реактора PWR // Промышленная энергетика. 2013. № 12. С. 45.
11. *Дмитриев С.М., Варенцов А.В., Добров А.А., Доронков Д.В., Легчанов М.А., Хробостов А.Е.* Исследования массообмена теплоносителя за перемешивающими решетками ТВС реакторов ВВЭР-300 с целью обоснования их эффективности // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 5. С. 197.
12. *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 // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2015. № 3. С. 134.
13. *Варенцов А.В., Доронков Д.В., Купричева Е.С., Солнцев Д.Н., Сорокин В.Д.* Экспериментальные исследования локального массообмена и эффективности перемешивания теплоносителя дистанционирующими решетками в ТВС реактора КЛТ-40С // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012. № 1. С. 107.
14. *Гухман А.А.* Введение в теорию подобия. М.: Высшая школа, 1973. 296 с.
15. *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.
16. *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.
17. *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.
18. *Митрофанова О.В.* Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. М.: Ленанд, 2020. 352 с.