

УДК 621.039

## Исследования гидродинамики теплоносителя за перемешивающей решеткой-интенсификатором тепловыделяющей сборки реактора PWR\*

С.М. Дмитриев, А.А. Добров, Д.В. Доронков, Д.С. Доронкова,  
К.Е. Иванова, К.А. Обидина, А.Н. Пронин, А.В. Рязанов,  
Д.Н. Солнцев, А.Е. Хробостов, О.Д. Ялымова

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

E-mail: nevid000@mail.ru

В статье приводятся результаты исследований течения теплоносителя за перемешивающими решетками-интенсификаторами тепловыделяющих сборок ТВС-Квадрат реакторов PWR. Цель работы заключается в оценке эффективности перемешивания теплоносителя за решетками-интенсификаторами различных конструкций и выбор их оптимальной конструкции. Для достижения поставленной цели проведен ряд экспериментов на аэродинамическом исследовательском стенде с масштабными моделями фрагментов твэльного пучка тепловыделяющих сборок с перемешивающими решетками-интенсификаторами, которые оснащались турбулизирующими дефлекторами различной формы профиля. В качестве области исследований выбраны ячейки, расположенные возле направляющего канала, и регулярные ячейки. Выбор области исследований обусловлен не только необходимостью получения гидродинамической картины течения теплоносителя в характерных ячейках и выбором оптимальной формы дефлектора, но и оценкой влияния поперечных течений теплоносителя из области направляющего канала на движение потока в смежных с ними ячейках. Картина течения теплоносителя представлена векторными полями поперечных скоростей, картограммами распределения поперечных и аксиальных скоростей, а также графическими зависимостями распределения компонент скорости потока. Анализ пространственного распределения поперечных и осевых скоростей потока позволил изучить и детализировать картину течения теплоносителя. Оценка эффективности перемешивания теплоносителя за решетками и определение оптимальной формы профиля дефлектора проводились на основе комплексного анализа гидродинамической картины течения теплоносителя и параметров внутриячейкового вихреобразования и межячейкового перемешивания. Результаты экспериментов могут использоваться при инженерном обосновании конструктивных решений при проектировании активных зон реакторов PWR с ТВС-Квадрат. Накопленная база опытных данных применяется для верификации CFD-программ (как зарубежной, так и отечественной разработки), а также программ теплогидравлического пояечного расчета активных зон.

**Ключевые слова:** ядерный реактор, активная зона, тепловыделяющая сборка, перемешивающая решетка-интенсификатор, твэл, направляющий канал, область исследований, характерная ячейка, гидродинамика теплоносителя, перемешивание теплоносителя, вихревое течение потока.

### Введение

В настоящее время идет завершающий этап разработки и внедрения новой российской тепловыделяющей сборки ТВС-Квадрат для реакторов западного дизайна PWR [1]. На основе исследовательских работ по обоснованию работоспособности, а также опыта

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

конструирования и эксплуатации топливных сборок водо-водяных энергетических реакторов [2–4] 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.

Введение указанных конструктивных элементов в состав активной зоны реактора требует обоснования тепловых и гидравлических условий, обеспечивающих надежное охлаждение этой зоны при режимах нормальной эксплуатации. Следует отметить, что предельные тепловые нагрузки твэлов и отклонения значений параметров теплоносителя должны обеспечивать с вероятностью не менее 95 % отсутствие кризиса теплоотдачи в активной зоне в стационарном режиме [5–7]. Таким образом, необходимо выявить наиболее энергонапряженные области как в активной зоне реактора, так и в самой тепловыделяющей сборке. К числу таких энергонапряженных областей в поперечном сечении ТВС-Квадрат относятся ячейки направляющего канала и смежные с ними регулярные ячейки. Выбор области направляющего канала обусловлен тем, что здесь ячейки имеют в поперечном сечении отличную от регулярных ячеек ассиметричную геометрию, характеризуются затеснением проходного сечения, и, как следствие, условия течения потока сильно отличаются от условий в регулярных ячейках. В свою очередь, в регулярных ячейках, смежных с областью направляющего канала, движение теплоносителя происходит под воздействием поперечных потоков из области направляющего канала, что может привести к разрушению структуры направленных конвективных течений, созданных перемешивающими решетками-интенсификаторами.

Таким образом, исследование гидродинамики теплоносителя в области направляющего канала и в смежных с ней регулярных ячейках с дефлекторами различного профиля, а также определение эффективности перемешивания теплоносителя являются актуальными задачами, при решении которых необходимо учитывать теплотехническую надежность активных зон ядерных реакторов PWR.

### **Исследовательский стенд и методика проведения экспериментов**

Аэродинамический исследовательский стенд [8, 9] представляет собой разомкнутый контур, в котором течение водяного теплоносителя в твэльном пучке ТВС-Квадрат моделируется потоком воздуха согласно теории гидродинамического подобия [10].

Основные рабочие параметры исследовательского стенда следующие: рабочая среда — воздух, производительность вентилятора — 18540 м<sup>3</sup>/час, полное давление в ресиверной емкости — 6 кПа, температурный диапазон воздушного потока: 20÷25 °С.

Для изучения гидродинамики теплоносителя была спроектирована и изготовлена экспериментальная модель, представляющая собой канал квадратного сечения, в котором поочередно размещались исследуемые макеты решеток-интенсификаторов 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  $K_r = 4,2$ .

Макеты решеток-интенсификаторов собраны из взаимно перпендикулярных пластин, верхние кромки которых снабжены смесительными лопатками — дефлекторами. Решетки, поочередно устанавливаемые в модель, отличаются формой профиля дефлекторов, углами отгиба лопатки и числом линий, по которым турбулизатор отгибается, остальные элементы решеток идентичны (рис. 1б).

Измерения полей давлений воздушного потока за решетками производилось пятиканальным пневмометрическим датчиком [11] (см. рис. 1с). Данное измерительное устройство перед проведением экспериментов подвергалось тарировке в воздушном

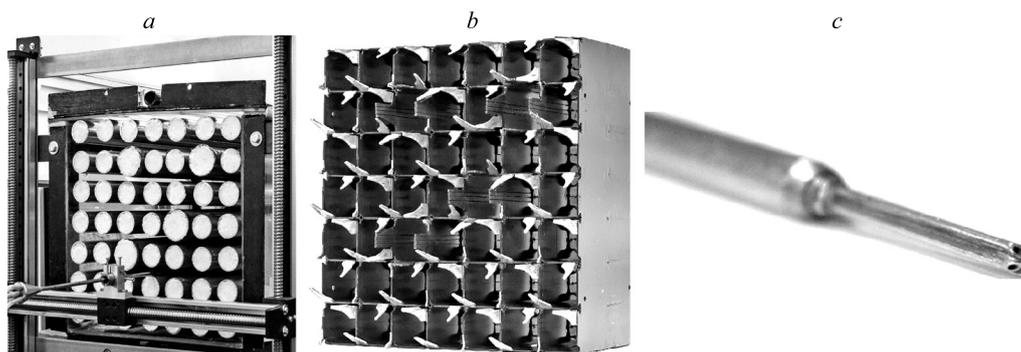


Рис. 1. Экспериментальная модель и измерительное оборудование.

*a* — выходная часть экспериментальной модели, *b* — макет перемешивающей решетки-интенсификатора, *c* — пятиканальный пневмометрический датчик.

потоке с заранее известной аксиальной скоростью, полным и статическим давлениями в точке его позиционирования. Измеренное поле давлений потока в модели, согласно тарировочным зависимостям, пересчитывалось в значения величины компоненты скорости. Далее на основе локальных значений скорости определялась трехмерная картина течения потока. Поперечные и осевые скорости устанавливались с погрешностью, не превышающей 7 %.

Для построения трехмерной картины течения теплоносителя за различными перемешивающими решетками-интенсификаторами была выбрана область поперечного сечения модели, показанная на рис. 2*a*, которая включала ячейки в районе направляющего канала и смежные с ними регулярные ячейки. Схема ориентации турбулизаторов в области исследований представлена на рис. 2*b*. Она применяется на всех решетках-интенсификаторах, за которыми проводились исследования.

Показательная область разбивалась на зоны, в каждой из которых измерялось поле давлений потока в характерных сечениях по длине модели за решетками. Все измерения проводились при одинаковом значении среднерасходной скорости воздушного потока на входе в модель. Значение скорости на входе составляло 43,3 м/с, а число Рейнольдса в твэльном пучке — 115000. Затем строились графические зависимости и картограммы распределения поперечных и аксиальных скоростей потока за перемешивающими

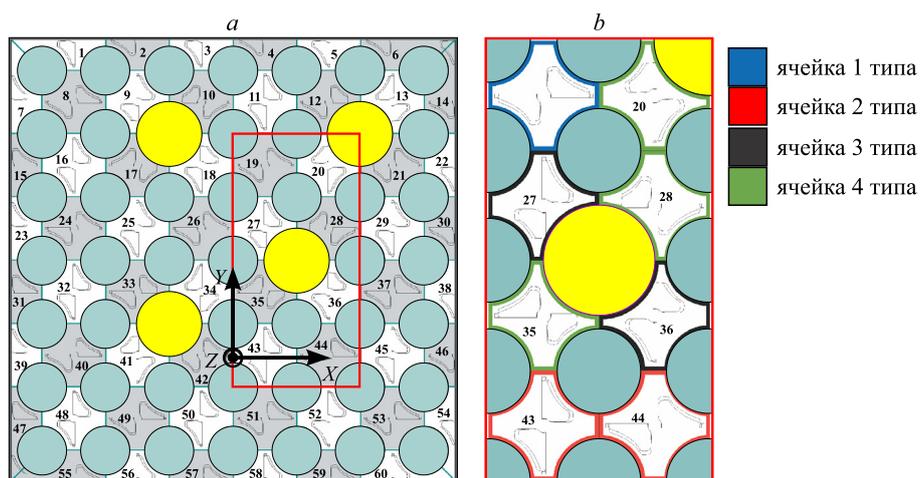


Рис. 2. Область исследований.

*a* — положение области в поперечном сечении экспериментальной модели, *b* — ориентация дефлекторов в области исследований и разделение ячеек на характерные типы.

решетками различной конструкции на основе безразмерных скоростей (то есть локальное значение каждой компоненты вектора скорости нормировалось на величину средне-расходной скорости на входе в модель), что позволило соотнести результаты экспериментов, полученных за дефлекторами различной формы профиля.

Исследования гидродинамики теплоносителя проводились в зоне автомодельного течения воздушного потока, которая характеризуется идентичностью безразмерных профилей скорости потока в каналах как для воздуха, так и для водяного теплоносителя. Следовательно, результаты экспериментов могут быть использованы при изучении штатных условий течения теплоносителя в активной зоне ядерного реактора. Обоснование представительности экспериментов подробно представлено в работах [12–14].

Также на исследовательском стенде был экспериментально определен коэффициент гидравлического сопротивления (КГС) решеток-интенсификаторов. Выполнение указанных работ обусловлено тем, что для представительности экспериментов необходимо соблюсти равенство КГС штатных и модельных решеток. Результаты измерения КГС показали, что значения КГС решеток-интенсификаторов модели соответствуют значениям КГС штатных решеток при идентичных числах Рейнольдса.

При проведении анализа картины течения теплоносителя за перемешивающими решетками-интенсификаторами область исследований разбивалась на четыре характерных типа ячеек (рис. 2*b*):

— 1 тип (ячейка № 19) — регулярная ячейка, движение теплоносителя в которой формируется двумя поперечными потоками из смежных с ней двух ячеек области направляющего канала № 18 и 29;

— 2 тип (ячейки № 43, 44) — регулярные ячейки, на движение теплоносителя в которых оказывает влияние поперечный поток, вытесняемый из ячеек области направляющего канала;

— 3 тип (ячейки № 27, 36) — ячейки области направляющего канала с штатным расположением дефлекторов;

— 4 тип (ячейки № 20, 28, 35) — ячейки области направляющего канала с измененным расположением дефлекторов.

В настоящей работе рассматриваются три варианта формы профиля дефлектора, представленных на рис. 3. Исходная форма профиля дефлектора (рис. 3*a*) имеет следующий вид: линия отгиба дефлектора лежит под углом  $15^\circ$  относительно грани пластины решетки, угол отгиба дефлектора относительно вертикали составляет  $25^\circ$ , турбулизатор имеет наименьшую площадь из всех представленных. В первой альтернативной форме профиля дефлектора (рис. 3*b*) площадь профиля увеличена на  $6,5\%$  относительно исходной, линия отгиба дефлектора лежит под углом в  $10^\circ$  относительно грани пластины решетки и поднята от кромки пластины решетки, угол отгиба дефлектора относительно вертикали составляет  $30^\circ$ . Во второй альтернативной форме профиля дефлектора (рис. 3*c*) площадь профиля увеличена на  $8,5\%$  относительно исходной, дефлектор имеет две линии отгиба. Первая линия отгиба лежит параллельно грани пластины решетки,

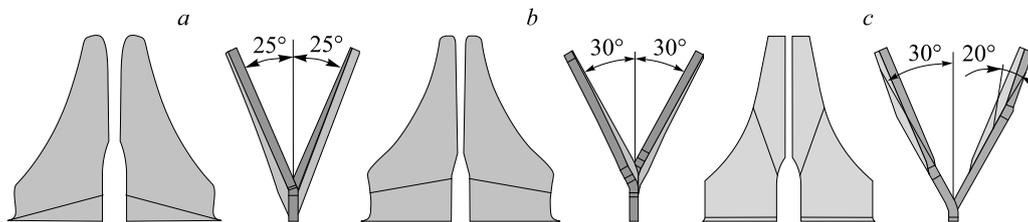


Рис. 3. Формы профилей дефлекторов.

*a* — дефлектор с исходной формой профиля, *b* — первая альтернативная форма профиля дефлектора, *c* — вторая альтернативная форма профиля дефлектора.

вторая линия отгиба расположена под углом  $70^\circ$  относительно горизонтали. Отгиб дефлектора по первой линии производится на  $30^\circ$ , а по второй на  $20^\circ$ .

В каждой из ячеек области исследований присутствует пара дефлекторов различной формы профиля (рис. 2*b*). В регулярных ячейках пара дефлекторов имеет идентичную форму профиля и отогнута в направлении только широких зазоров между твэлами. В ячейках области направляющего канала форма профиля дефлекторов отличается. Первый дефлектор, который будем называть «основным», обладает широким основанием (рис. 3) и отогнут в направлении зазора между твэлом и направляющего канала (рис. 2*b*). Второй дефлектор, образующий пару, имеет на 20 % уменьшенную относительно «основного» дефлектора ширину основания и отгиб в направлении зазора между твэлами. Данный турбулизатор будем называть «дополнительным». Уменьшение ширины основания дефлектора обусловлено наличием элемента крепления решетки и направляющего канала.

Экспериментальные исследования включали в себя следующие этапы: изучение особенностей формирования вихревого течения потока в ячейках; исследование образования поперечных течений потока между ячейками; изучение распределения аксиальной скорости потока теплоносителя в области исследований; выбор оптимального профиля дефлектора для оценки интенсивности перемешивания теплоносителя с использованием интегральных параметров межячеечного обмена  $F_{\text{mix}}$  и завихренности потока  $F_{\text{vortex}}$  [12].

### Результаты исследований гидродинамики теплоносителя

Анализ векторных полей течения потока теплоносителя за дефлекторами различной формы позволил сделать следующие выводы.

1. За всеми формами дефлекторов во всех ячейках области исследований возникают локальные вихри и направленные поперечные течения между группами смежных ячеек согласно ориентации турбулизаторов (рис. 4).

2. Вихревое течение теплоносителя за турбулизаторами различной формы наблюдается на разных расстояниях за решеткой: за дефлекторами исходной и второй альтернативной форм профилей — на расстоянии  $L/d_r = 1,9$ , а за дефлектором первой альтернативной формы — на расстоянии  $L/d_r = 3,4$ , что может быть обусловлено линией отгиба, расположенной дальше от кромки пластины решетки, чем у других турбулизаторов (рис. 4).

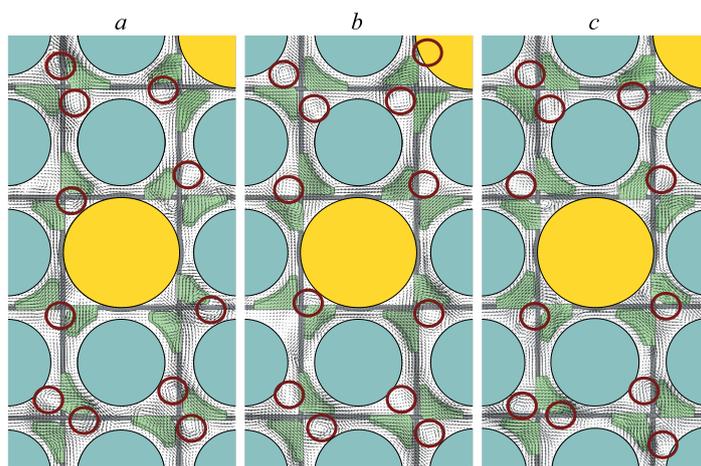


Рис. 4. Векторные поля поперечных скоростей потока за дефлектором с исходной формой профиля ( $L/d_r = 1,85$ ) (a), за дефлектором первой альтернативной формы профиля ( $L/d_r = 3,43$ ) (b), за дефлектором второй альтернативной формы профиля ( $L/d_r = 1,85$ ) (c).

3. Вихревое течение теплоносителя в ячейках области исследований за всеми исследуемыми дефлекторами имеет схожий характер, а именно: в регулярных ячейках (№ 19, 43, 44) образуются два вихря, локализованные в областях поперечного сечения ячеек не занятых профилем дефлекторов, а в ячейках области направляющего канала (№ 20, 27, 28, 35, 36) независимо от схемы расположения дефлекторов образуется один вихрь, расположенный в области поперечного сечения ячейки, не занятой профилем дефлекторов (рис. 4). Также наблюдается процесс кругового движения вихрей в поперечном сечении каждой из ячеек, направление которого обусловлено взаимной ориентацией дефлекторов.

4. Рассеяние вихрей в ячейках происходит на разных расстояниях за решеткой и зависит как от формы, угла отгиба и схемы расположения дефлекторов, так и от геометрии пучка твэлов. Здесь можно отметить несколько случаев.

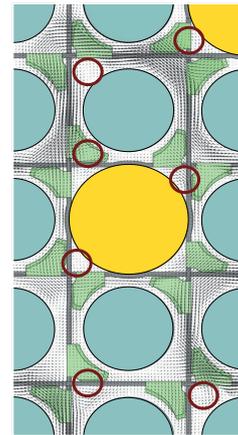
а) В регулярной ячейке № 19 за дефлектором исходной формы профиля вихри отсутствуют на расстоянии  $L/d_r = 5,3$ . За альтернативными формами дефлекторов это расстояние увеличивается и составляет для первой альтернативной формы  $L/d_r = 18,5$ , а для второй альтернативной формы —  $L/d_r = 10,6$ . Столь значительная разница в продолжительности существования вихревого течения потока может быть обусловлена как формой турбулизаторов, так и структурой поперечных течений теплоносителя в области исследований.

б) В регулярных ячейках № 43, 44, независимо от формы профиля дефлектора, на расстоянии  $L/d_r = 5,3$  наблюдается только один крупный вихрь, локализованный в центре ячейки. Для дефлекторов исходной и первой альтернативной форм профиля вихревое течение потока наблюдается на протяжении всего участка проведения измерений. За дефлектором второй альтернативной формы профиля на расстоянии  $L/d_r = 13,2$  вихри отсутствуют, однако, начиная с расстояния  $L/d_r = 18,5$ , наблюдается образование вторичных вихрей, локализованных в центре ячеек и у поверхности стержней. Данный процесс обусловлен наличием второй линии отгиба у дефлектора, а также перестроением поперечных потоков теплоносителя из соседних ячеек.

в) В ячейках области направляющего канала с штатным расположением дефлекторов (№ 27, 36) за решеткой с дефлекторами исходной и второй альтернативной форм профиля, начиная с расстояния  $L/d_r = 5,3$ , наблюдается смещение вихрей в поперечном сечении ячеек в направлении зазора между твэлами, движение потока в которых организовано дополнительным дефлектором, а на расстоянии  $L/d_r = 7,9$  наличие вихревых структур не фиксируется. В свою очередь за дефлекторами первой альтернативной формы вихрь занимает все поперечное сечение ячеек и сохраняет свою структуру на всей длине измерений. Отдельно следует отметить, что за дефлекторами второй альтернативной формы профиля вторичные вихри фиксируются начиная с расстояния  $L/d_r = 10,6$ . Они сохраняют свою структуру по всей оставшейся длине измерений.

г) Для ячеек с измененной схемой ориентации дефлекторов (№ 20, 28, 35) характерна значительная дифференциация длины жизни вихрей за дефлекторами различной формы. За дефлектором исходной формы вихрь в ячейке № 20 отсутствует на расстоянии  $L/d_r = 7,9$ , а в ячейках № 28, 35 — на расстоянии  $L/d_r = 15,8$ . За дефлекторами первой альтернативной формы вихревое течение теплоносителя наиболее устойчиво: в ячейках № 28, 35 вихревая структура отсутствует, начиная с расстояния за решеткой  $L/d_r = 15,8$ , а в ячейке № 20 вихрь наблюдается по всей длине исследуемого участка. За дефлекторами второй альтернативной формы вихри не фиксируются уже на расстоянии  $L/d_r = 10,6$ . Далее, на расстоянии  $L/d_r = 18,5$  наблюдается появление вторичных вихрей, расположенных около стенки направляющего канала (рис. 5). Образование вторичных вихрей может быть обусловлено как наличием второй линии отгиба у дефлектора, так и интенсивным перераспределением поперечных потоков за решеткой.

Рис. 5. Векторные поля тангенциальных скоростей потока за дефлектором второй альтернативной формы профиля на расстоянии  $L/d_r = 18,46$  за решеткой.



5. Поперечные течения из ячеек области направляющего канала, обусловленные уменьшением площади проходного сечения, а также воздействием на поток «дополнительных» дефлекторов, приводят к значительному искажению аксиального и поперечного течений потока теплоносителя в регулярных ячейках, граничащих с областью направляющего канала. Искажение движения потока характеризуется смещением вихревых структур в поперечном сечении регулярных ячеек с дальнейшим их размывом; изменением направления поперечных течений теплоносителя через зазоры между стрижнями; появлением локальных минимумов аксиальной скорости потока в поперечном сечении ячеек.

Искажение движения потока наиболее ярко выражено в регулярной ячейке № 19, расположенной между двумя областями направляющего канала. В этой регулярной ячейке поперечные потоки из области направляющего канала, организованные согласно схеме, представленной на рис. 6, приводят к снижению в два раза продолжительности вихревого течения теплоносителя и значительному отличию интенсивности поперечных течений в ячейке № 19 относительно регулярных ячеек № 43 и 44.

Комплексный анализ картограмм распределения поперечных скоростей и графических зависимостей поперечных скоростей потока за дефлекторами различной формы позволил заключить следующее.

1. Непосредственно за решеткой ( $L/d_r = 1,9$ ) независимо от формы дефлектора максимальные значения поперечной скорости локализованы на вершинах профилей лопаток. Величина безразмерной поперечной скорости ( $W_{xy}/\bar{W}$ ) составляет  $0,35 \div 0,55$  от среднерасходной (рис. 6) ( $W_{xy}$  — поперечная скорость потока,  $\bar{W}$  — среднерасходная скорость потока на входе в экспериментальный канал).

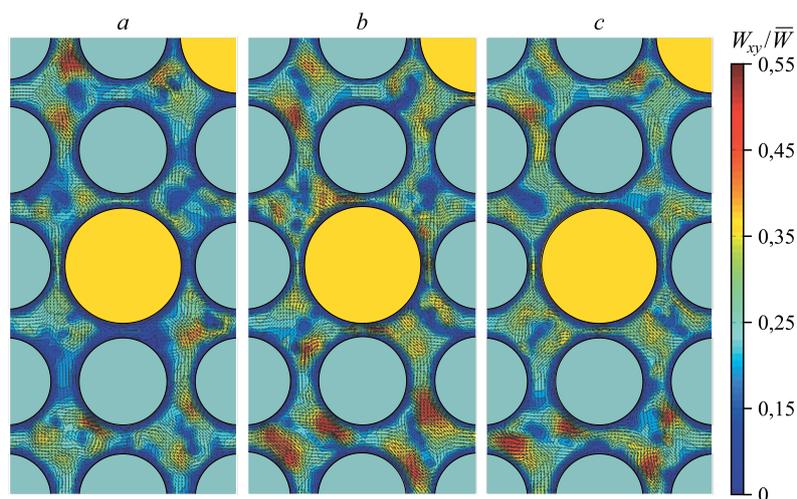


Рис. 6. Картограммы распределения поперечных скоростей потока на расстоянии  $L/d_r = 1,86$  за решеткой.

$a$  — дефлектор с исходной формой профиля,  $b$  — первая альтернативная форма профиля дефлектора,  $c$  — вторая альтернативная форма профиля дефлектора.

2. В регулярных ячейках величина безразмерной поперечной скорости ( $W_{xy} / \bar{W}$ ) на профиле дефлекторов на 30 % больше, чем в ячейках направляющего канала, что обусловлено отсутствием в этих ячейках второго полноразмерного дефлектора (рис. 6).

3. На расстоянии  $L/d_r = 3,4$  наблюдается процесс перемещения максимумов безразмерной поперечной скорости ( $W_{xy} / \bar{W}$ ) с вершин профилей лопаток в зазоры между твэлами, расположенными по направлению действия турбулизатора. Данный процесс характеризуется снижением поперечной скорости до  $0,3 \div 0,45$  от среднерасходной.

4. На расстоянии  $L/d_r = 7,9$  для всех исследуемых форм дефлекторов начинается процесс формирования устойчивых конвективных потоков по всей области исследования, а на расстоянии  $L/d_r = 10,6$  для всех исследуемых типов дефлекторов процесс формирования конвективных потоков завершается, и далее, начиная с расстояния  $L/d_r = 13,2$ , наблюдается процесс постепенного затухания поперечной безразмерной скорости ( $W_{xy} / \bar{W}$ ).

5. На формирование устойчивых конвективных течений в исследуемой области оказывают влияние два фактора: разрушение поперечных течений теплоносителя между смежными ячейками направляющего канала и интенсивность вихреобразования во всех ячейках исследуемой области. Направления конвективных течений представлены на рис. 7.

6. За решетками с дефлекторами исходной и второй альтернативной форм наблюдается процесс разрушения поперечных течений между смежными ячейками направляющего канала, характеризующийся сменой знака поперечной скорости. Схема расположения зазоров между стержнями в области направляющих каналов приведена на рис. 8, графические зависимости поперечных скоростей потока теплоносителя представлены на рис. 9 ( $W_i$  — проекция вектора скорости на соответствующую ось системы координат,  $\bar{W}$  — среднерасходная скорость потока на входе в экспериментальный канал). За дефлектором первой альтернативной формы направление поперечного течения теплоносителя в области направляющего канала не изменяется.

Указанные выше факторы приводят к формированию различных картин поперечных макротечений теплоносителя за разными формами дефлекторов: за дефлекторами исходной и второй альтернативной форм профили поперечные потоки преимущественно организуются в регулярных ячейках, а за дефлектором первой альтернативной формы

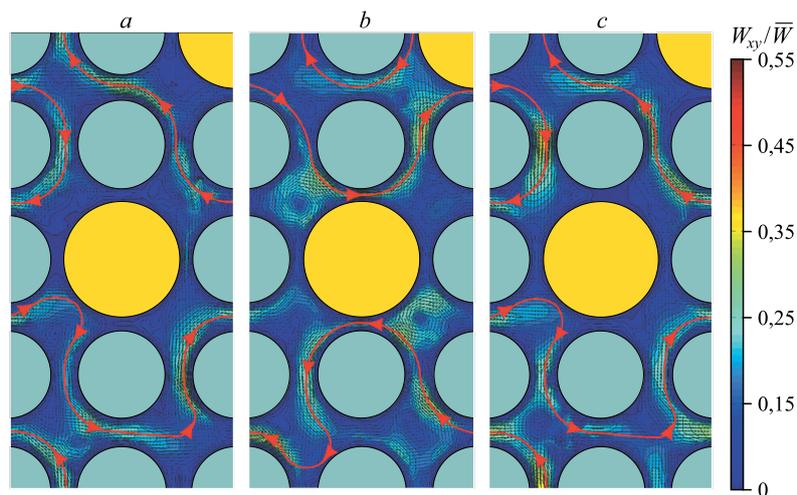


Рис. 7. Картограммы распределения поперечных макротечений теплоносителя на расстоянии  $L/d_r = 1,85$  за решеткой.

Обозначения см. на рис. 6.

Рис. 8. Схема расположения зазоров между ячейками области направляющего канала в исследуемой области.

профиля — в ячейках области направляющего канала (рис. 7). Данное распределения поперечных потоков характеризуется тем, что значение поперечной скорости, осредненное по зазорам между стержнями области направляющего канала, больше на 20 % за дефлектором первой альтернативной формы, чем в регулярных ячейках, а за дефлекторами исходной и второй альтернативной форм профиля, наоборот, поперечная скорость в регулярных ячейках на 20 % выше, чем в ячейках направляющего канала.

Анализ картограмм распределения аксиальной составляющей вектора скорости в исследуемой области показал следующее.

1. Наибольшие значения осевой скорости наблюдаются в областях ячеек, занятых профилем дефлектора. Величина осевой скорости составляет здесь 1,3 от среднерасходной.

2. Смещение максимумов аксиальной скорости потока с профилей дефлекторов в зазоры между твэлами, расположенными по направлению действия турбулизаторов, наблюдается в регулярных ячейках в сечении  $L/d_t = 3,4$ . В ячейках направляющего канала такого процесса не наблюдается, поскольку отсутствует второй полноразмерный дефлектор.

3. Вблизи поверхности стержней, расположенных в области организации направленных поперечных течений, наблюдаются зоны низкой аксиальной скорости, составляющей  $0,85 \div 0,9$  от среднерасходной, расположенные на диагоналях, проходящих через

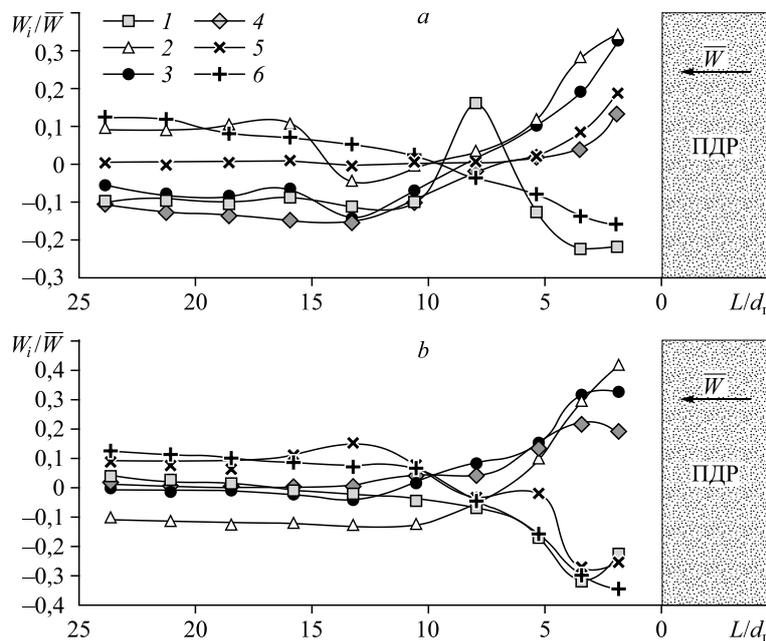
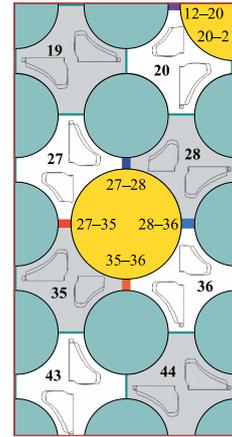


Рис. 9. Графические зависимости поперечных скоростей потока теплоносителя в зазорах между стержнями области направляющих каналов.

*a* — дефлектор с исходной формой профиля,  
*b* — вторая альтернативная форма профиля дефлектора;  
 зазоры между ячейками № 22 и 12 (1), 27 и 35 (2),  
 27 и 28 (3), 20 и 21 (4), 28 и 36 (5), 35 и 36 (6).

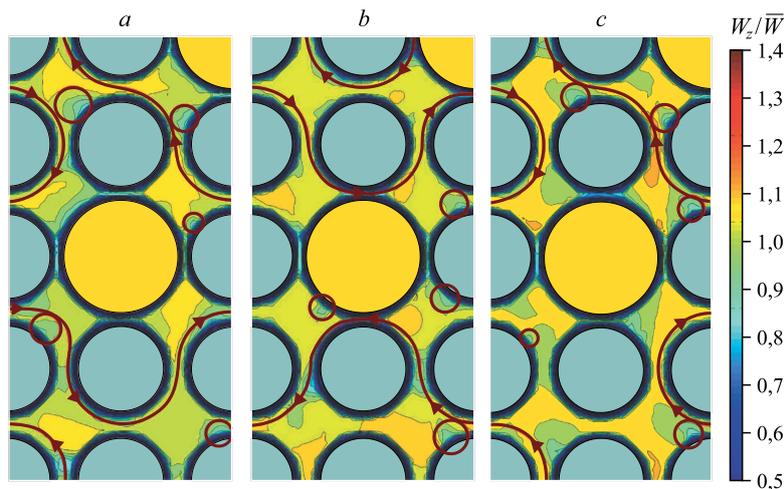


Рис. 10. Картограммы распределения аксиальной скорости потока теплоносителя на расстоянии  $L/d_r = 1,85$  за решеткой.

Обозначения см. на рис. 6.

центры стержней (рис. 10). Количество зон низкой аксиальной скорости в поперечном сечении области исследований не зависит от формы дефлектора, а место их локализации преимущественно определяется схемой организации поперечных течений теплоносителя.

4. Выравнивание неоднородности поля аксиальной скорости между ячейками исследуемой области происходит на разных расстояниях от решетки и зависит от формы дефлектора. Так, за решеткой с дефлектором исходной формы аксиальные скорости выравниваются на расстоянии  $L/d_r \approx 20$  за решеткой. За решеткой с дефлектором первой альтернативной формы аксиальные скорости выравниваются на расстоянии  $L/d_r \approx 15$  за решеткой. За решеткой с дефлектором второй альтернативной формы аксиальные скорости выравниваются на расстоянии  $L/d_r \approx 18$  за решеткой.

5. Независимо от типа дефлектора различие между аксиальными расходами потока через регулярные ячейки и ячейки направляющего канала непосредственно за решеткой составляет  $20 \div 25$  %, а на расстоянии  $L/d_r \approx 23$  —  $16$  %.

Из выше указанного можно заключить, что основной вклад в перераспределение осевых расходов теплоносителя вносит не форма и размер дефлекторов, а различие в площадях проходных сечений ячеек показательной области.

#### Оценка эффективности перемешивания потока дефлекторами различной формы профиля

Оценка эффективности перемешивания потока проводилась с помощью интегральных параметров межячеечного обмена  $F_{\text{mix}}$  и завихренности потока  $F_{\text{vortex}}$  [12].

Параметр межячеечного обмена  $F_{\text{mix}}$  характеризует поперечное перетекание теплоносителя между ячейкам показательной области и определяется по формуле

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

здесь  $S$  — ширина зазора между твэлами,  $V_{\text{cross}}$  — компонента вектора скорости потока через зазор между твэлами,  $U$  — средняя аксиальная скорость потока в ячейке.

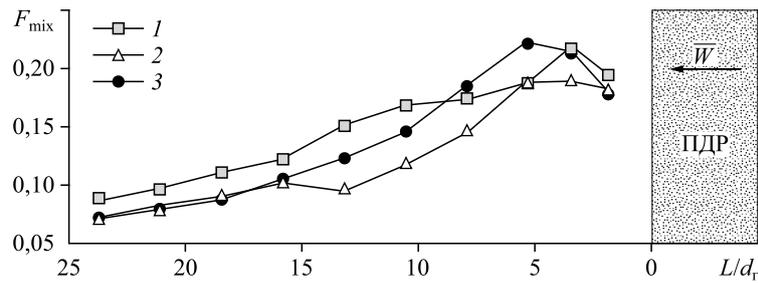


Рис. 11. Значения параметра межячейкового обмена для регулярных ячеек.

1 — дефлектор с исходной формой профиля, 2 — первая альтернативная форма профиля дефлектора, 3 — вторая альтернативная форма профиля дефлектора.

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

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

здесь  $V_{\text{lateral}}$  — поперечная составляющая вектора скорости потока,  $U_{\text{local}}$  — 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.

Результаты определения параметров межячейкового обмена и завихренности потока показали следующее.

1. В регулярных ячейках параметр межячейкового взаимодействия  $F_{\text{mix}}$  за дефлекторами исходной и второй альтернативной форм профилей имеет на 20 % большую величину, чем за дефлектором первой альтернативной формы (рис. 11). В ячейках области направляющего канала наблюдается обратная картина: за дефлектором первой альтернативной формы параметр межячейкового взаимодействия имеет на 20 % бóльшую величину, чем за дефлекторами исходной и второй альтернативной форм профилей (рис. 12). Данное распределение параметра межячейкового обмена  $F_{\text{mix}}$  свидетельствует о различной организации поперечных потоков за дефлекторами разных форм, а именно: за дефлекторами исходной и второй альтернативной форм профилей поперечные потоки проходят через регулярные ячейки, а за дефлектором первой альтернативной формы профиля — через ячейки направляющего канала, что подтверждает полученные экспериментальные данные.

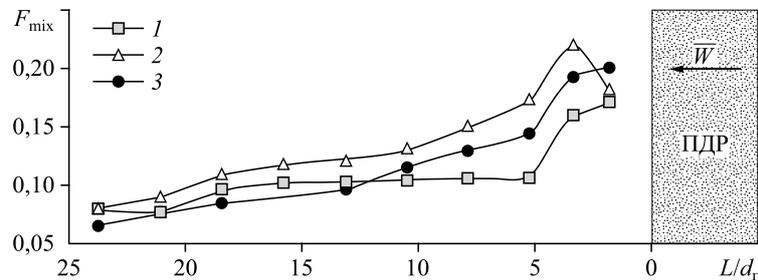


Рис. 12. Значения параметра межячейкового обмена для ячеек области направляющего канала.

Обозначения см. на рис. 11.

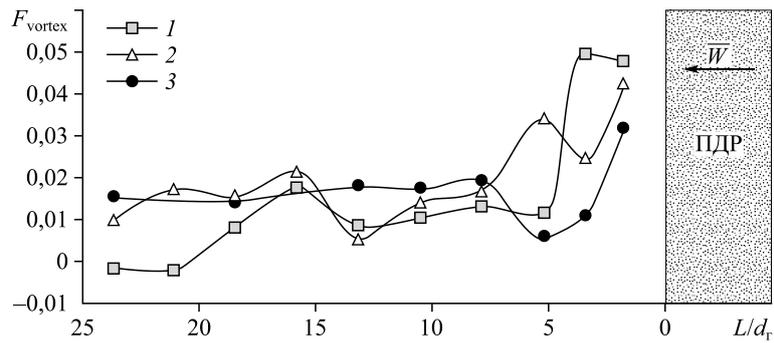


Рис. 13. Значения параметра завихренности потока для регулярных ячеек. Обозначения см. на рис. 11.

2. Параметр завихренности потока  $F_{\text{vortex}}$  в регулярных ячейках за любым из исследуемых дефлекторов непосредственно за решеткой имеет близкие значения и составляет  $0,03 \div 0,05$ . На расстоянии  $L/d_r = 24$  за дефлекторами первой и второй альтернативных форм профилей параметр завихренности потока демонстрирует близкие значения и составляет  $0,01 \div 0,02$ , а за дефлектором исходной формы профиля на расстоянии  $L/d_r = 20$  у него меняется знак, что свидетельствует о рассеивании вихревой структуры в ячейках данного типа (рис. 13).

3. Параметр завихренности потока  $F_{\text{vortex}}$  в ячейках направляющего канала за дефлектором первой альтернативной формы в  $2 \div 3$  раза выше, чем за остальными турбулизаторами, что свидетельствует о значительно большей интенсивности вихреобразования за дефлекторами данного типа (рис. 14).

4. Осредненный параметр межячейкового взаимодействия  $F_{\text{mix}}$  по зазорам между стержнями всей показательной области демонстрирует, что интенсивность поперечных течений теплоносителя между ячейками имеет близкие величины для всех исследуемых типов дефлекторов и составляет непосредственно за решеткой величину  $0,18 \div 0,2$ , а на расстоянии  $L/d_r = 24$  —  $0,07$  (рис. 15). В свою очередь, осредненный по всей исследуемой области параметр завихренности потока  $F_{\text{vortex}}$  за дефлектором первой альтернативной формы имеет значительно большую величину, чем за другими турбулизаторами (рис. 16).

На основании вышеизложенного можно заключить, что дефлектор первой альтернативной формы профиля создает более интенсивное вихревое течение теплоносителя внутри ячеек, чем остальные исследуемые турбулизаторы. С другой стороны, интенсивность поперечных потоков между ячейками за всеми исследуемыми типами дефлекторов находится на одном уровне.

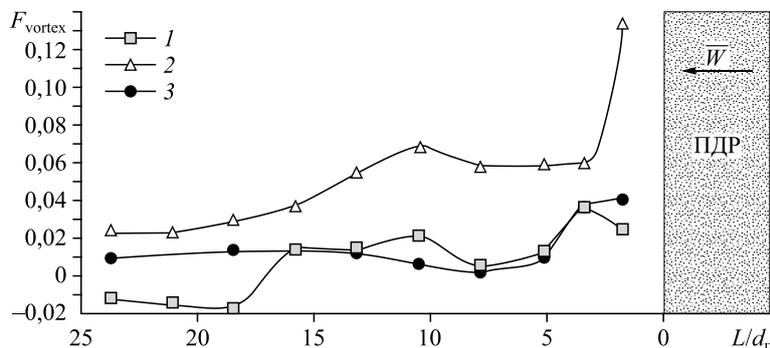


Рис. 14. Значение параметра завихренности потока для ячеек области направляющего потока. Обозначения см. на рис. 11.

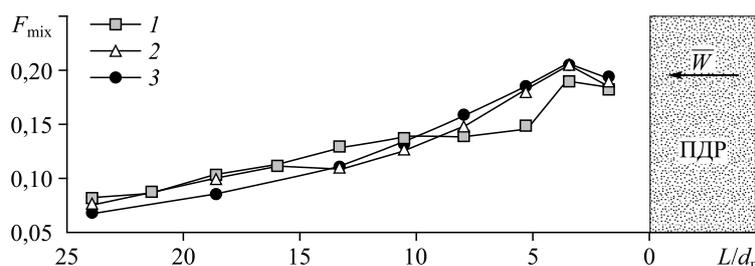


Рис. 15. Значения параметра межячейкового обмена для всех ячеек показательной области.

Обозначения см. на рис. 11.

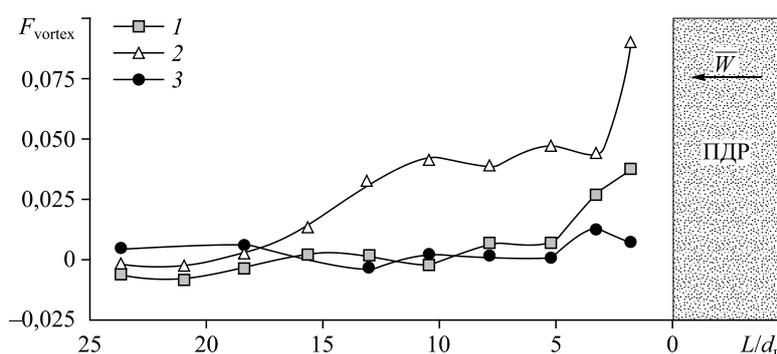


Рис. 16. Значения параметра завихренности потока для всех ячеек показательной области.

Обозначения см. на рис. 11.

Таким образом, при оценке эффективности дефлекторов с помощью параметров межячейкового обмена и завихренности потока выявлено, что наиболее интенсивно перемешивает поток теплоносителя дефлектор первой альтернативной формы профиля.

### Заключение

Комплексный анализ результатов экспериментального моделирования течения потока теплоносителя в твэльном пучке ТВС-Квадрат за перемешивающими решетками-интенсификаторами позволил сделать следующие выводы.

1. За всеми формами дефлекторов во всех ячейках показательной области возникают локальные вихри и направленные поперечные течения между группами смежных ячеек согласно ориентации турбулизаторов.

2. За дефлектором второй альтернативной формы профиля поперечные макротечения теплоносителя организованы в ячейках, прилежащих к направляющему каналу, а за дефлекторами исходной и первой альтернативной форм поперечные течения организованы преимущественно в поле регулярных ячеек, занимающих большую часть поперечного сечения тепловыделяющей сборки.

3. Вихревое течение теплоносителя во всех ячейках области исследований наибольшую интенсивность и продолжительность приобретает за дефлектором первой альтернативной формы. За лопатками исходной формы профиля вихревое движение потока имеет наименьшую интенсивность.

4. За дефлекторами второй альтернативной формы профиля на расстоянии  $L/d_r = 10 \div 15$  за решеткой наблюдается массовое образование вторичных малых вихрей, лока-

лизованных как в центрах ячеек, так и около стенок твэлов и направляющих каналов, что обеспечивает интенсивную турбулизацию потока на больших расстояниях от перемешивающих решеток-интенсификаторов.

На основании вышеизложенных результатов можно заключить, что наиболее интенсивное перемешивание теплоносителя как внутри отдельных ячеек, так и между соседними ячейками обеспечивается дефлекторами первой и второй альтернативных форм профиля.

### Список литературы

1. Зверев Д.Л., Самойлов О.Б., Романов А.И., Панов В.А., Фальков А.А., Шолин Е.В., Зотов С.А. Топливо для ВВЭР и PWR. Современное состояние и перспективы // Атомная энергия. 2020. Т. 129, вып. 2. С. 63–64.
2. 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.
3. 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.
4. Лисенков Е.А., Безруков Ю.А., Селезнев А.В., Васильченко И.Н., Чуркин А.Н., Лобачев С.М. Экспериментальное исследование перемешивания теплоносителя в ТВС-2М с интенсификаторами теплообмена // Тяжелое машиностроение. 2017. № 4. С. 19–24.
5. 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.
6. Самойлов О.Б., Куприянов А.В., Фальков А.А., Шипов Д.Л., Молодцов А.А., Лукьянов В.Е. Экспериментальные исследования критических тепловых потоков и разработка корреляции для ТВСА с перемешивающими решетками-интенсификаторами // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2016. № 3. С. 47–53.
7. Безруков Ю.А., Астахов В.И., Быков М.А., Стребнев Н.А., Лисенков Е.А. Анализ зависимостей для расчета критического теплового потока при обосновании безопасности реакторной установки // Теплоэнергетика. 2010. № 5. С. 14–18.
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, вып. 5. С. 252–257.
9. 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 // Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012. № 1. С. 107–113.
10. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. М.: Высшая школа, 1973. 296 с.
11. 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.
12. Митрофанова О.В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. М.: Физматлит, 2010. 288 с.

*Статья поступила в редакцию 22 мая 2021 г.,  
после доработки — 22 июня 2021 г.,  
принята к публикации 30 июля 2021 г.*