

УДК 621.039

Экспериментальные исследования локальной гидродинамики потока теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР с ТВСА–12PLUS

С. М. Дмитриев*, Д. В. Доронков, М. А. Легчанов,
А. Н. Пронин, А. Е. Хробостов

Представлены результаты экспериментальных исследований локальной гидродинамики и межъячеечного массообмена потока теплоносителя в активной зоне ядерного реактора ВВЭР с ТВСА–12PLUS. Цель работы заключалась в исследовании распределения локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока в тепловыделяющей сборке за перемешивающей и дистанционирующей решетками. Испытания проводили на аэродинамическом стенде методом диффузии трассера при помощи пневмометрических зондов. По результатам исследований были получены распределения аксиальных составляющих скорости по ячейкам и концентрации трассера в экспериментальной модели. Эти данные позволили детализировать картину, выявить особенности течения теплоносителя за перемешивающей и дистанционирующей решетками ТВСА–12PLUS и были приняты для практического использования в АО «ОКБМ Африкантов» при оценке теплотехнической надежности активных зон реакторов ВВЭР–1000 с ТВСА–12PLUS.

Ключевые слова: тепловыделяющая сборка, дистанционирующая и перемешивающая решетки, гидродинамика, тепломассоперенос.

Введение

В АО «ОКБМ Африкантов» для реакторов ВВЭР–1000 была разработана топливная кассета ТВСА–12PLUS [1]. Особенностью ее конструкции является наличие интенсификаторов теплообмена — перемешивающих решеток типа «порядная прогонка». Применение подобных решеток позволяет дополнительно турбулизовать поток, выровнять температуры и энтальпии теплоносителя по сечению сборки и повысить запас до кризиса теплоотдачи.

Обоснование теплотехнической надежности активной зоны ядерного реактора с данной топливной кассетой — один из этапов, который следует пройти на пути от разработки ядерного топлива до поставки его на атомную станцию. Для проведения обоснования теплотехнической надежности реакторов ВВЭР следует определить влияние всех элементов конструкции ТВСА–12PLUS на гидродинамику потока теплоносителя. Решить эту задачу можно путем проведения комплекса экспериментов, направленных на изучение локальных гидродинамических характеристик в активной зоне ядерного реактора. Данные исследования проводятся в научно-исследовательской лаборатории «Реакторная гидродинамика» на базе НГТУ им. П. Е. Алексеева путем моделирования процессов тече-

* dmitriev@nntu.nnov.ru

ния потока теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР на аэродинамическом стенде.

Экспериментальный стенд

В состав экспериментального стенда входят: вентилятор высокого давления, ресиверная емкость, участок стабилизации воздушного потока, экспериментальная модель, система подачи трассера, измерительный комплекс. За счет работы вентилятора воздух попадает в ресиверную емкость, необходимую для сглаживания пульсаций расхода воздуха. Затем воздух поступает на участок стабилизации, после чего направляется в экспериментальную модель и выбрасывается в атмосферу.

Экспериментальная модель представляет собой фрагмент активной зоны реактора ВВЭР с ТВСА–12PLUS. Она выполнена в полном геометрическом подобии с натурным фрагментом активной зоны и включает в себя сегменты трех топливных кассет, межкассетное пространство, пояса дистанционирующих и перемешивающих решеток, имитаторы твэлов. Ее конструкция позволяет не только оценить влияние перемешивающих и дистанционирующих решеток на гидродинамику потока, но и изучить межкассетное взаимодействие между соседними ТВСА–12PLUS.

Перемешивающая решетка типа «порядная прогонка» выглядит как набор пластин, на верхних кромках которых используются турбулизирующие дефлекторы (рис. 1). При прохождении через перемешивающую решетку поток теплоносителя отклоняется дефлекторами от осевого направления, что приводит к возникновению направленных поперечных течений. Дефлекторы на перемешивающей решетке ориентированы таким образом, что под их воздействием создаются направленные поперечные течения, которые в соседних рядах формируют противоположно направленные потоки. По краям банджа перемешивающей решетки установлен зубчатый край обода, служащий для исключения зацепления соседних ТВС друг с другом при извлечении кассет из активной зоны.

Измерительный комплекс

При проведении экспериментальных исследований были использованы: трубка Пито–Прандтля, блок аналоговых преобразователей давления, расходомер газа, газоанализатор.

По перепаду полного и статического давлений в точке, измеряемых при помощи трубки Пито–Прандтля,

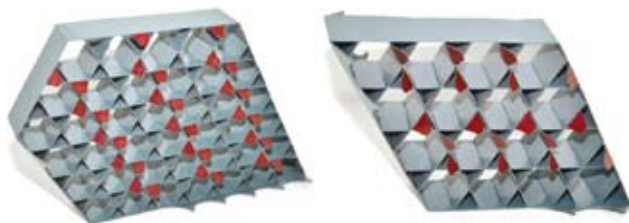


Рис. 1. Перемешивающая решетка типа «порядная прогонка»

определялось значение осевой скорости потока в каждой ячейке. Для снятия показаний использовался блок аналоговых преобразователей давления. Погрешность данных преобразователей составляет $\pm 0,25\%$ от измеряемого значения [2].

Для определения значения концентрации пропана в газозооной смеси использовался газоанализатор. Диапазон измеряемых концентраций составил 0 — 10000 ppm, при этом если измеряемое значение концентрации находилось в диапазоне 0 — 1000 ppm, его погрешность составляла ± 15 ppm, если значение концентрации пропана превышало 1000 ppm, то погрешность равнялась $\pm 1,5\%$ [3].

Для обеспечения постоянного расхода трассера через модель использовался расходомер газа. Он позволял устанавливать расход газа в диапазонах от 0,014 мл/мин до 1670 л/мин при давлениях до 400 бар с точностью 0,5% [4].

Методика исследований

Изучение формирования локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока в ТВСА–12PLUS проводили в два этапа: на первом исследовали влияние перемешивающей решетки типа «порядная прогонка» на гидродинамику потока теплоносителя в ТВСА–12PLUS, а на втором — влияние дистанционирующей решетки на гидродинамику потока в активной зоне с ТВСА–12PLUS.

Исследования межъячейочного массообмена выполнялись методом диффузии примесей, который основан на регистрации поперечного потока массы по некоторой переносимой субстанции. В качестве примеси был выбран пропан, поскольку он обладает близкими к воздуху свойствами, возможностью быстрой и достаточно точной регистрации.

Было изготовлено две экспериментальные модели, которые отличались друг от друга взаимным расположением перемешивающей и дистанционирующей решеток (рис. 2). Для изучения влияния перемешивающей решетки на течение теплоносителя использовалась схема № 1 (см. рис. 2), а для исследования влияния дистанционирующей решетки — схема № 2 (см. рис. 2).

Поперечное сечение экспериментальной модели разбивалось на элементарные ячейки, каждой из которых присваивался свой номер (рис. 3). Трассер через впускной зонд с постоянным расходом подавался в характерную ячейку, после чего отслеживалось его распространение в поперечных сечениях по длине и в экспериментальной модели.

Процесс межъячейочного массопереноса за перемешивающей решеткой исследовался в трех характерных областях: области стандартных ячеек центральной части ТВСА–12PLUS (ячейка инъекции трассера № 74), угловой ТВСА–12PLUS (ячейка инъекции трассера № 42) и в зазоре между соседними топливными кассетами (ячейка инъекции трассера № 4). Ячейки ин-

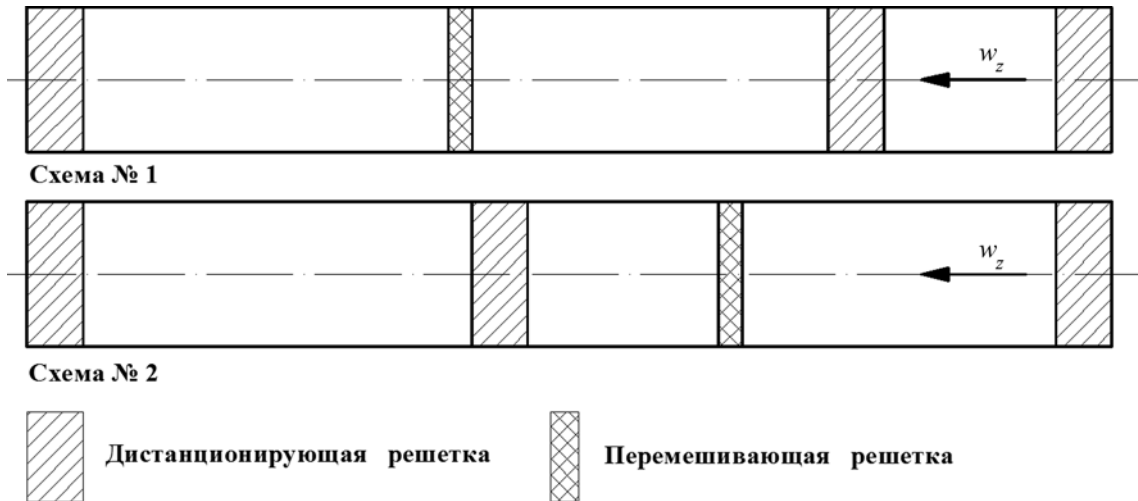


Рис. 2. Схемы расположения перемешивающей и дистанционирующих решеток в экспериментальных моделях

жекции показаны на рис. 3. Концентрация трассера за перемешивающей решеткой по ходу движения потока измерялась в каждой ячейке в нескольких сечениях по длине экспериментальной модели.

Исследования гидродинамических характеристик потока за дистанционирующей решеткой заключались в изучении распределения аксиальных составляющих скоростей теплоносителя по ячейкам экспериментальной модели в зависимости от вида затеснения проходного сечения. Особенности конструкции дистанционирующей решетки приводят к тому, что ячейки экспериментальной модели можно разделить на два типа (рис. 4). В ячейках первого типа (см. рис. 4, а) пружинистые элементы дистанционирующей решетки затесняют центр элементарной ячейки, в ячейках второго типа (см. рис. 4, б) центр ячейки остается свободным.

Методика исследований влияния дистанционирующей решетки на эффективность работы перемешивающей решетки заключалась в следующем. Трассер подавался до перемешивающей решетки, за которой по ходу движения установлена дистанционирующая решетка. Рассматривалось распределение трассера за дистанционирующей решеткой в модели и проводилось сравнение глубины распространения трассера при ее наличии и отсутствии за перемешивающей решеткой.

Представительность экспериментальных исследований

Важным этапом любого экспериментального исследования, в котором выполняется моделирование какого-либо процесса, является подтверждение его представительности. Согласно теории гидродинамического подобия профиль относительной скорости $w_{лок} / w_{ср.расх}$ ($w_{лок}$ — локальная скорость потока в заданной точке, $w_{ср.расх}$ — средняя скорость потока через экспериментальную модель) в зоне автомодельного течения остается практически неизменным [5]. Следо-

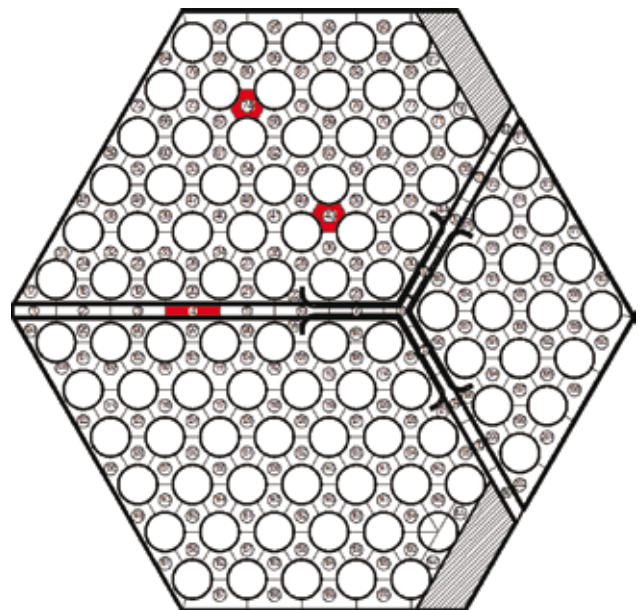


Рис. 3. Разбиение поперечного сечения экспериментальной модели на элементарные ячейки

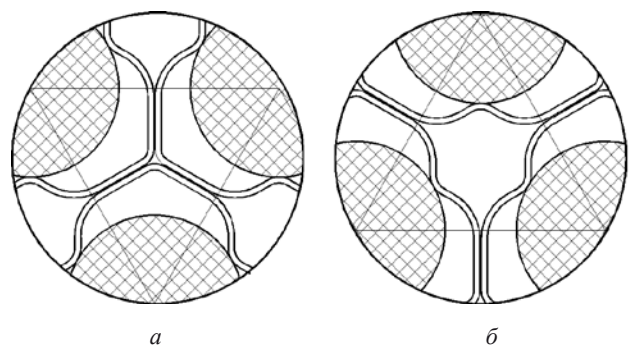


Рис. 4. Виды затеснения проходного сечения ячеек модели элементами дистанционирующей решетки

вательно, при моделировании воздухом течения теплоносителя в активной зоне реактора исследования необходимо проводить в области автомодельного течения.

Это позволит получить данные, которые можно будет перенести на натурные условия течения теплоносителя.

Был проведен ряд экспериментов, направленных на изучение режимов течения потока в исследуемой модели. Основная цель заключалась в поиске нижней границы зоны автомодельности. Было установлено, что область автомодельного течения теплоносителя в экспериментальной модели начинается при достижении числа $Re = 55000$ (см. рис. 3). Все исследования проводились на участке стабилизированного течения при числе $Re = 80090$ и, следовательно, полученные данные могут быть перенесены на натурные условия течения теплоносителя в ТВС.

Также были выполнены исследования по определению коэффициентов местного гидравлического сопротивления перемешивающих и дистанционирующих решеток. Установлено, что коэффициенты для решеток экспериментальной модели равны коэффициентам местного гидравлического сопротивления соответствующих решеток в натурной конструкции ТВС. Подтверждение этого равенства также является необходимым условием при обосновании представительности проводимых исследований.

Результаты экспериментальных исследований гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в экспериментальной модели

По результатам исследований влияния перемешивающей решетки типа «порядная прогонка» на гидродинамические и массообменные характеристики по-

тока теплоносителя в ТВСА–12PLUS были сделаны следующие выводы:

1) за дефлекторами перемешивающей решетки создаются направленные конвективные течения, обусловленные соответствующим расположением дефлекторов (рис. 5);

2) не весь трассер движется в направлении, определенном дефлектором. Часть его передается в соседние ячейки за счет турбулентного массообмена, имеющего значительно большую величину за перемешивающей решеткой вследствие дополнительной турбулизации потока;

3) затухание возмущений массообменных характеристик, вызванных воздействием перемешивающей решетки на поток теплоносителя, происходит на расстоянии $\Delta l/d_r = 17 - 18$ от решетки (Δl — расстояние от решетки до точки измерения; d_r — гидравлический диаметр);

4) трассер на расстоянии $\Delta l/d_r = 22$ от перемешивающей решетки в центральной части распространился в 28 ячеек, а в периферийной области в 21 ячейку (рис. 6). Это позволяет сделать вывод о том, что интенсивность процессов межячеечного массообмена в центральной области ТВСА–12PLUS и угловой области близки;

5) глубина распространения трассера из межкассетного зазора в соседние ТВСА–12PLUS на расстоянии $\Delta l/d_r = 22$ от перемешивающей решетки охватывает область двух периферийных рядов твэлов каждой из касет, что говорит о хорошем межкассетном перемешивании теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР с ТВСА–12PLUS (рис. 7).

6) зубчатый край обода решетки создает направленное течение теплоносителя, причем интенсивность

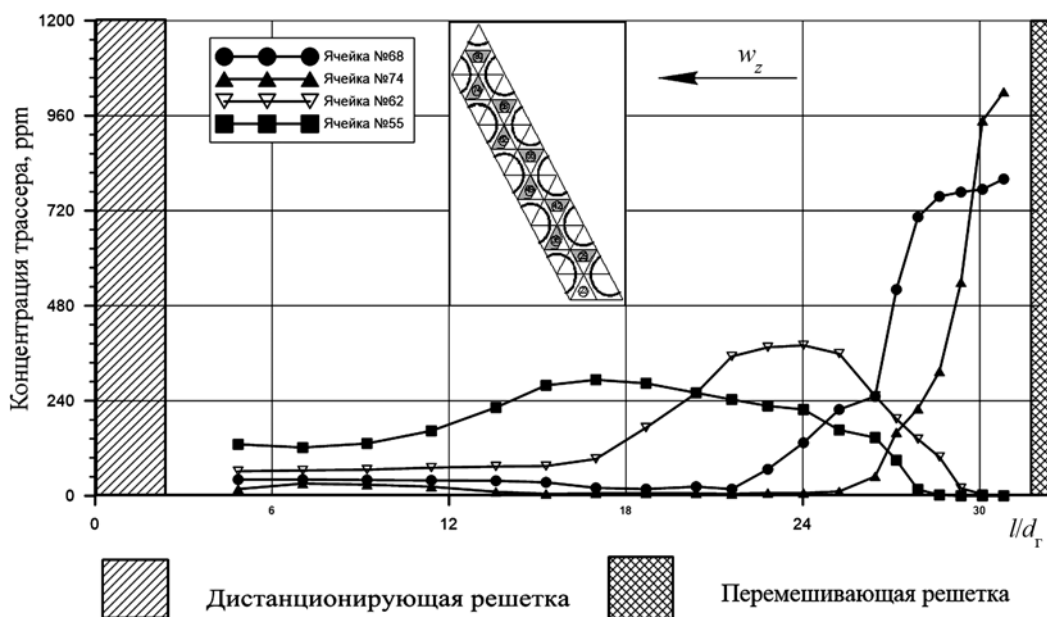


Рис. 5. Распределение концентрации трассера за перемешивающей решеткой в области стандартных ячеек центральной части ТВСА–12PLUS ($\bar{w} = 28,16$ м/с, $Re = 80100$)

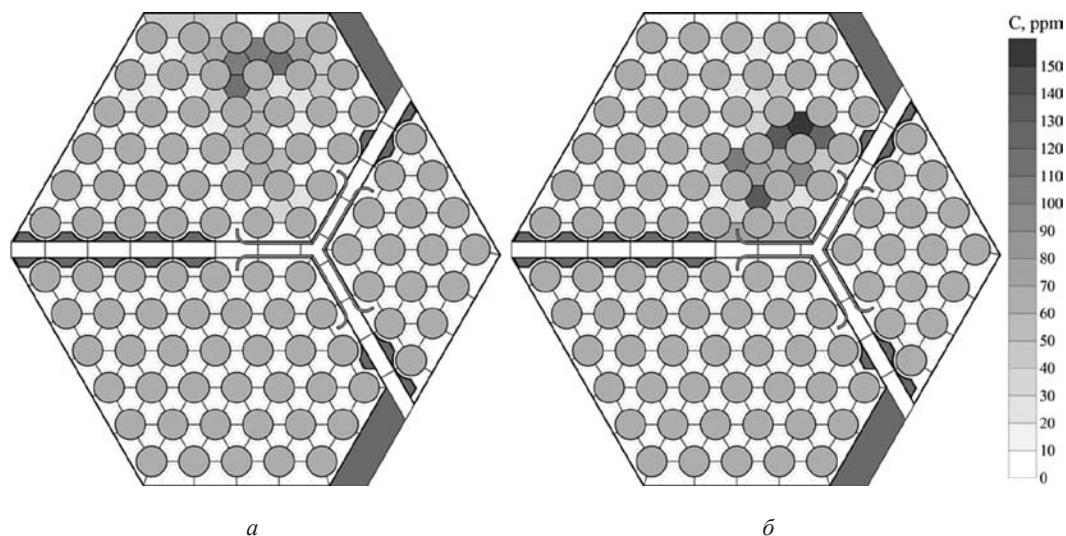


Рис. 6. Распределение концентрации трассера в экспериментальной модели при его подаче в стандартные ячейки центральной части ТВСА–12PLUS (а) и уголковой области ТВСА–12PLUS (б)

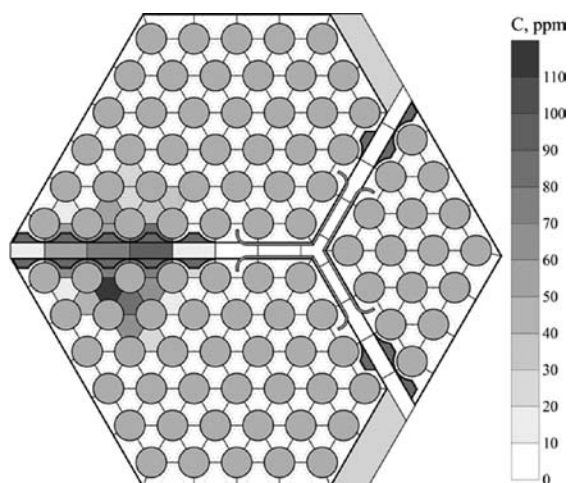


Рис. 7. Распределение концентрации трассера в экспериментальной модели при подаче трассера межкассетный зазор ($\bar{w} = 28,16$ м/с, $Re = 80100$)

межъячеечного массообмена выше в тех ячейках, где его ориентация совпадает с ориентацией турбулизирующих дефлекторов.

По результатам исследований влияния дистанционирующей решетки на гидродинамику потока было установлено:

1) в стандартных ячейках, центр которых затесняется дистанционирующей решеткой, отношение аксиальной составляющей скорости w_z к среднерасходной скорости через модель $w_{\text{ср.расх}}$ на 5 — 10% меньше чем в ячейках, в которых центр не затеснен (рис. 8);

2) трассер из ячейки подачи за перемешивающей решеткой на расстоянии $\Delta/d_r = 11$ распространился в 16 ячеек. За дистанционирующей решеткой максимум концентрации трассера наблюдается сразу за решеткой и далее по длине не переходит в другие ячейки (рис. 8). Это говорит о том, что воздействие дефлек-

торов на поток теплоносителя за ДР прекращается и дальнейшее перемешивание осуществляется посредством турбулентной диффузии. Таким образом, можно сделать вывод о том, что дистанционирующая решетка, расположенная после перемешивающей, сглаживает возмущения массообменных характеристик, вносимых перемешивающей решеткой (рис. 9, 10). Это приводит к уменьшению глубины распространения трассера в поперечном сечении ЭМ и, как следствие, к снижению эффективности перемешивающих решеток как интенсификаторов массообмена;

3) установка дистанционирующих решеток за перемешивающими по ходу движения теплоносителя нецелесообразна на расстояниях, меньших, чем длина затухания возмущений массообменных характеристик, вызванных перемешивающей решеткой.

Заключение

Анализ экспериментальных данных, полученных при исследовании локальной гидродинамики и межъячеечного массообмена теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР, позволил выявить картину течения потока за перемешивающей и дистанционирующей решетками в ТВСА–12PLUS и сделать следующие выводы:

1) за дефлекторами перемешивающей решетки типа «порядная прогонка» происходит направленное, постепенно затухающее движение трассера, обусловленное соответствующим расположением дефлекторов;

2) глубина распространения трассера в стандартных ячейках центральной и уголковой областей свидетельствует о том, что интенсивность межъячеечного массообмена в данных областях одинакова;

3) в ячейках, где ориентация турбулизирующих дефлекторов и зубчатого края обода решетки совпадает, интенсивность межъячеечного массопереноса возрастает;

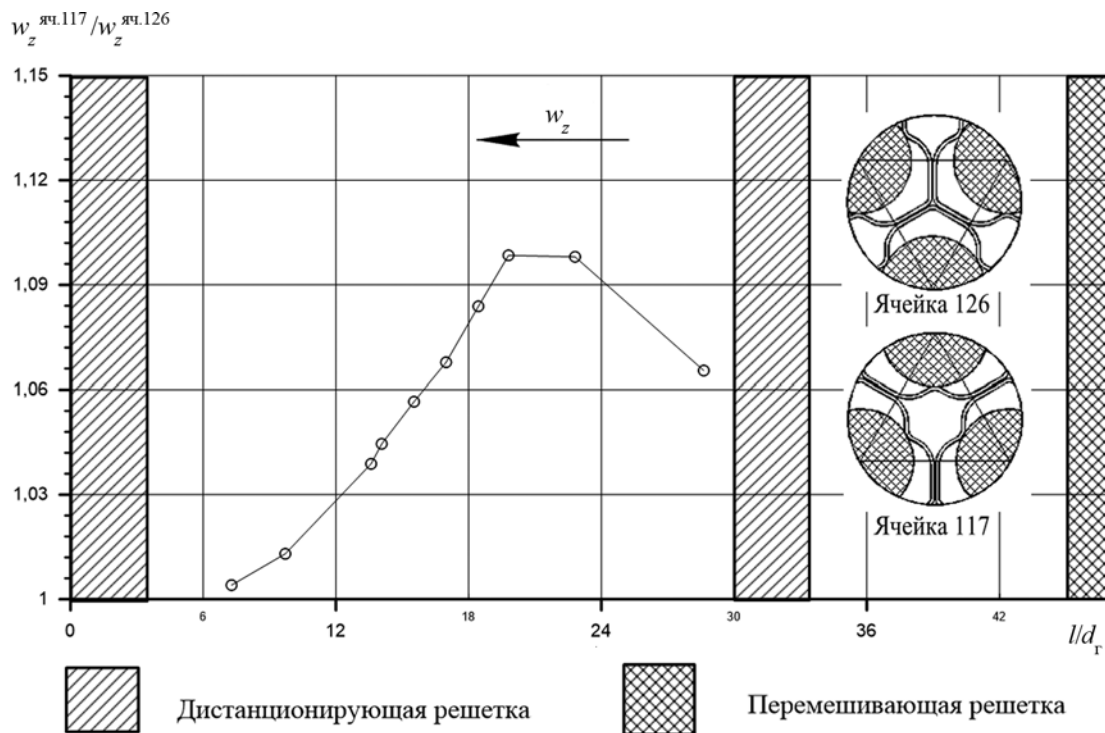


Рис. 8 Отношение аксиальных скоростей в стандартных ячейках в зависимости от вида затеснения проходного сечения ($\bar{w} = 28,16$ м/с, $Re = 80100$)

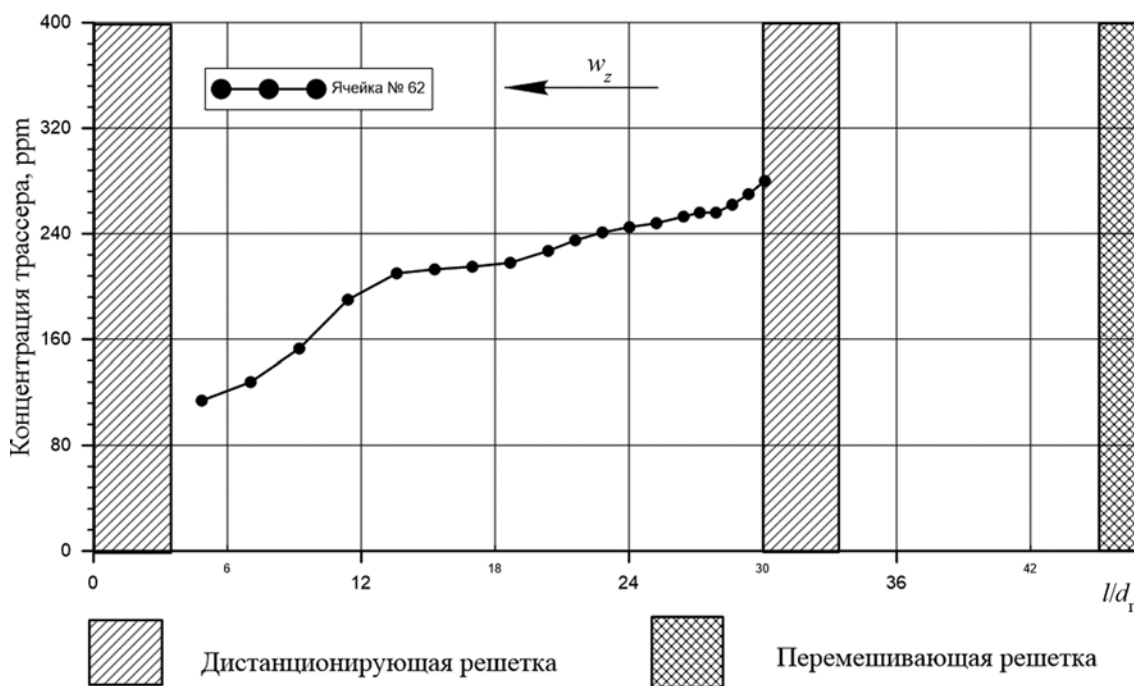


Рис. 9. Распределение концентрации трассера за дистанционирующей решеткой в ячейке № 62 (ячейка подачи трассера № 74, $\bar{w} = 28,25$ м/с, $Re = 77380$)

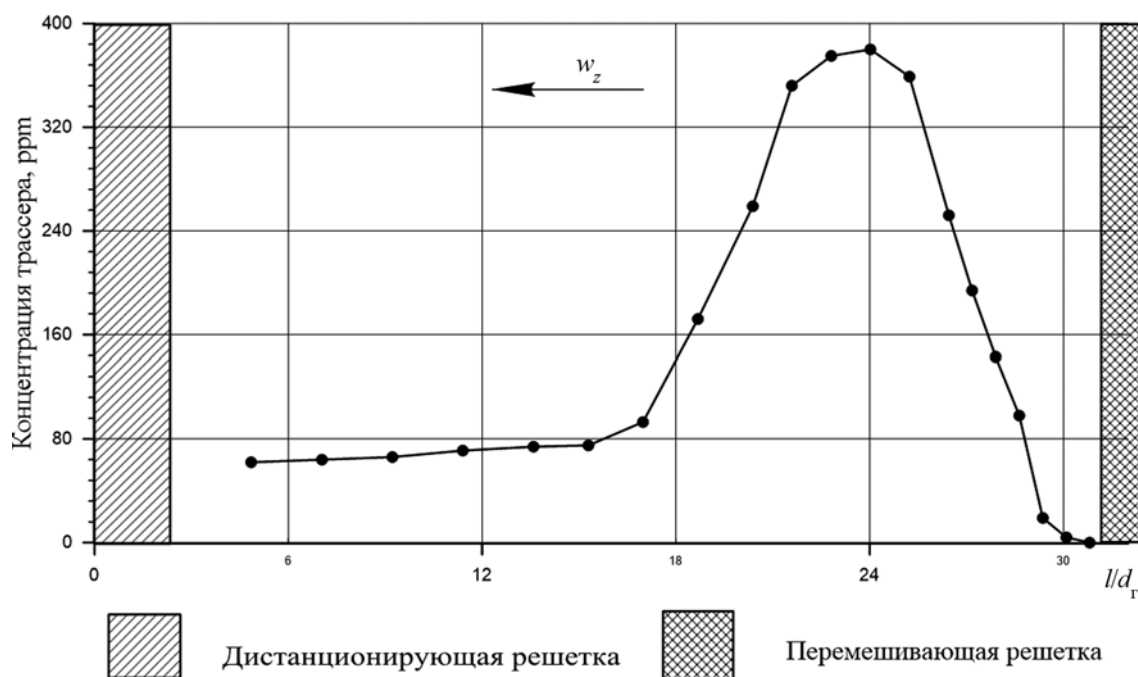


Рис. 10. Распределение концентрации трассера за перемешивающей решеткой в ячейке № 62 (ячейка подачи трассера № 74, $\bar{w} = 28,16$ м/с, $Re = 80100$)

4) в стандартных ячейках, где пружинистые элементы дистанционирующей решетки затесняют центр, отношение осевой скорости к среднерасходной скорости теплоносителя через экспериментальную модель на 5 — 10% меньше, чем в ячейках, где пружинистые элементы формируют свободное пространство в центре ячейки;

5) наличие дистанционирующей решетки, расположенной после перемешивающей решетки, приводит к сглаживанию возмущений, вносимых перемешивающей решеткой. Это приводит к уменьшению глубины распространения трассера в экспериментальной модели и, как следствие, к снижению эффективности перемешивающих решеток как интенсификаторов теплообмена.

Полученные экспериментальные результаты приняты в АО «ОКБМ Африкантов» для практического использования. Объем данных, полученных при проведении экспериментальных исследований и обработке полученных результатов, используется при обосновании теплотехнической надежности активных зон реакторов ВВЭР–1000 с ТВСА–12PLUS.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0124 от 03 декабря 2014 г. (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

Литература

1. Дмитриев С.М. и др. Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах: учебник. М.: Машиностроение, 2013.
2. Дмитриев С.М. и др. Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в ТВС-Квадрат реакторов PWR с перемешивающими решетками // Теплоэнергетика. 2014. № 8. С. 20 — 27.
3. Дмитриев С.М. и др. Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР // Атомная энергия. 2012. Т. 113. Вып. 5. С. 252 — 256.
4. Дмитриев С.М. и др. Расчетно-экспериментальные исследования гидродинамики и массообмена теплоносителя за дистанционирующей решеткой тепловыделяющей сборки реактора плавучего энергоблока // Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. 2014. № 4. С. 60 — 68.
5. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. М. Высшая школа, 1973.

Статья поступила в редакцию 05.10.2015