

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА ВВЭР С ТВСА

**С.М. Дмитриев*, А.В. Герасимов*, А.А. Добров*, Д.В. Доронков*,
А.Н. Пронин*, А.В. Рязанов*, Д.Н. Солнцев*, А.Е. Хробостов*,
А.С. Носков**, О.Б. Самойлов**, Ю.К. Швецов**, Д.Л. Шипов****

* Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24

**АО «ОКБМ Африкантов»

603074, г. Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, 15



Представлены результаты экспериментального исследования перемешивания теплоносителя между соседними тепловыделяющими сборками в активной зоне реактора ВВЭР, состоящей из ТВСА-Т и усовершенствованной ТВСА. Моделирование процессов течения потока теплоносителя в активной зоне проводилось на аэродинамическом исследовательском стенде. Эксперименты проводились на моделях, представляющих собой различные фрагменты твэльного пучка активной зоны реактора ВВЭР, и заключались в измерении поперечных и аксиальной скоростей воздушного потока в характерных зонах, расположенных как в самих тепловыделяющих сборках, так и межкассетном пространстве. Перенос результатов экспериментов на натурные условия течения теплоносителя может быть осуществлен с использованием теории гидродинамического моделирования. Измерения проводились пятиканальным пневмометрическим зондом. Картина течения теплоносителя в различных фрагментах твэльного пучка представлена графиками и картограммами распределения поперечных и аксиальных составляющих вектора скорости в характерных зонах моделей. Анализ пространственного распределения поперечных и аксиальной составляющих вектора скорости позволил детализировать картину обтекания теплоносителем дистанционирующих, перемешивающих и комбинированных дистанционирующих решеток тепловыделяющих сборок различных конструкций. Накопленная база данных по течению теплоносителя в ТВСА различных конструкций является основой инженерного обоснования надежности и работоспособности активных зон реакторов ВВЭР. Результаты исследования межкассетного перемешивания теплоносителя между ТВСА различных конструкций приняты для практического использования в АО «ОКБМ Африкантов» при оценке теплотехнической надежности активных зон реакторов ВВЭР и включены в базу данных для верификации программ вычислительной гидродинамики (CFD-кодов) и программ детального поячеечного расчета.

© С.М. Дмитриев, А.В. Герасимов, А.А. Добров, Д.В. Доронков, А.Н. Пронин, А.В. Рязанов, Д.Н. Солнцев, А.Е. Хробостов, А.С. Носков, О.Б. Самойлов, Ю.К. Швецов, Д.Л. Шипов, 2020

Ключевые слова: активная зона, тепловыделяющая сборка, дистанционирующие решетки, перемешивающие решетки, межкассетное взаимодействие, гидродинамика теплоносителя.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время была проведена частичная перегрузка активной зоны реактора ВВЭР второго энергоблока АЭС «Темелин» [1], в рамках которой были загружены тепловыделяющие сборки новой модификации, пришедшие на замену штатным ТВСА-Т. Обе тепловыделяющие сборки разработаны АО «ОКБМ Африкантов».

По сравнению с тепловыделяющими сборками ТВСА-Т основным отличием усовершенствованной ТВСА (далее – ТВСА^У) является применение отдельно стоящих перемешивающих решеток (ПР), которые обеспечивают более интенсивное перемешивание теплоносителя в поперечном сечении сборки, что позволило улучшить эксплуатационные характеристики новой тепловыделяющей сборки [2 – 11].

Поскольку оба типа ТВС являются бесчехловыми, перемешивание теплоносителя происходит не только в одной топливной сборке, но и между соседними сборками. Данное явление необходимо учитывать в процессе обоснования теплотехнической надежности активной зоны [12], что обусловило необходимость проведения комплексных исследований процесса межкассетного перемешивания теплоносителя между соседними ТВСА различных конструкций в смешанной активной зоне реактора ВВЭР.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

Моделирование течения теплоносителя в активной зоне производилось на аэродинамическом исследовательском стенде [13 – 19].

Для проведения исследований были изготовлены экспериментальные модели (ЭМ), геометрически соответствующие конструкции различных высотных участков твэльного пучка активной зоны реактора ВВЭР. Все компоненты ЭМ пропорционально увеличены на коэффициент геометрического подобия $K_r = 4,4$.

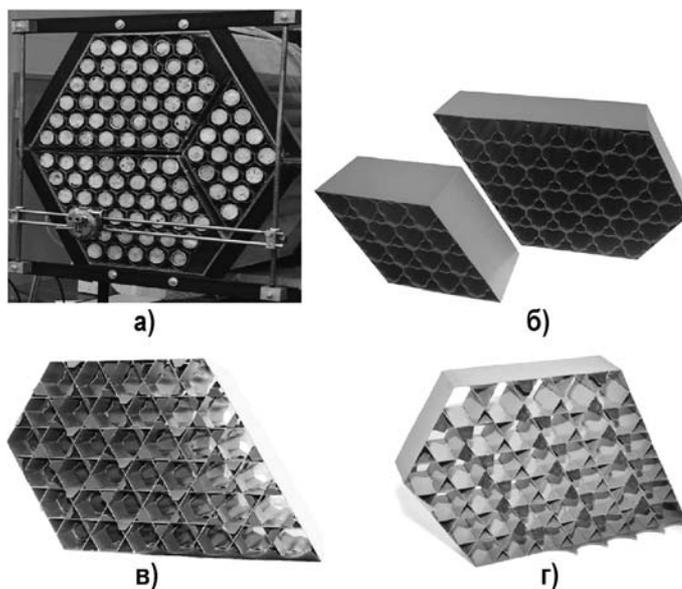


Рис. 1. ЭМ и пояса решеток топливных кассет: а) – ЭМ фрагмента активной зоны реактора ВВЭР; б) – пояс ДР ТВСА^У и ТВСАТ; в) – пояс КДР ТВСА-Т; г) – пояс ПР ТВСА^У

Экспериментальные модели включали в себя один сегмент сборки ТВСА-Т, два сегмента усовершенствованной ТВСА и межкассетное пространство (рис. 1а).

Дистанционирующая решетка ДР (рис. 1б) состоит из пружинистых элементов, расположенных согласно треугольной упаковке и объединённых стальным ободом. Комбинированная дистанционирующая решетка КДР ТВСА-Т (рис. 1в) снабжена турбулизаторами потока, размещенными по схеме «закрутка вокруг твэла», угол отгиба турбулизаторов составляет 38° . Перемешивающая решетка ПР (рис. 1г) снабжена турбулизаторами с углом отгиба в 30° , размещенными согласно схеме «порядная прогонка». Все решетки снабжены имитаторами профилированного отгиба обода.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

Измерение локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя производилось пневмометрическим зондом. Датчик выполнен в виде пяти стальных капилляров, расположенных в двух перпендикулярных друг к другу плоскостях. Полученное поле давлений потока, согласно зависимостям, полученным при тарировке, пересчитывалось в направление и величину абсолютной скорости потока [20]. Зонд выполнен таким образом, чтобы не вносить возмущения в поток и не искажать направление его течения. Погрешность определения составляющих вектора скорости не превышает 7%. Снятие показаний с зонда осуществлялось преобразователем давления САПФИР-22Р, имеющим допускаемый предел основной погрешности $\pm 0,25\%$.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В поперечном сечении смешанной активной зоны была выделена показательная область, состоящая из одной штатной ТВСА-Т и двух ТВСА^У. В продольном сечении твэльный пучок активной зоны был разделен на три характерных высотных фрагмента, обозначенных как «нижний», «средний» и «верхний» согласно движению потока теплоносителя снизу-вверх.

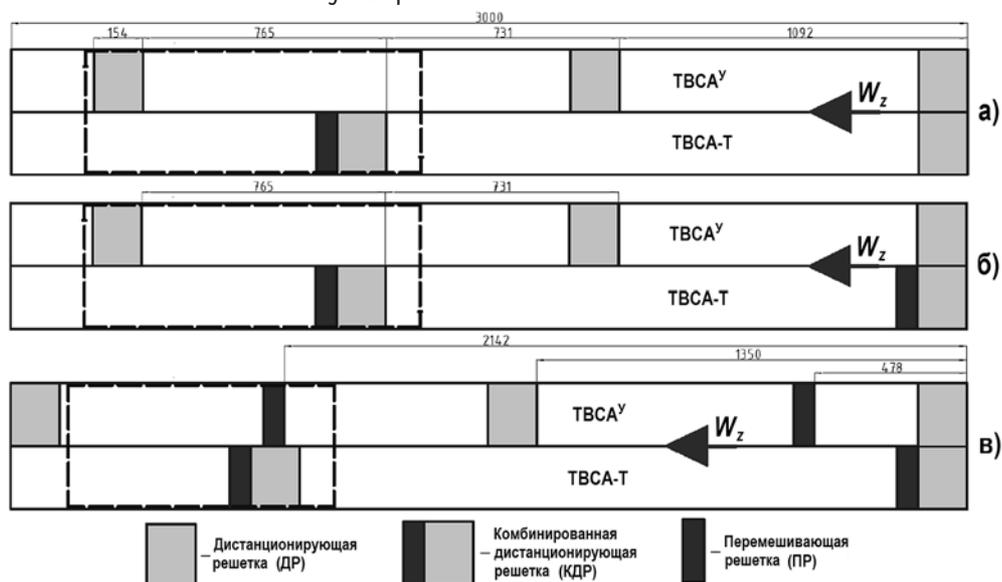


Рис. 2. Схема расположения решеток в различных фрагментах твэльного пучка ТВСА: а) «нижний» фрагмент; б) «средний» фрагмент; г) «верхний» фрагмент

«Нижний» фрагмент твэльного пучка начинается от первых идентично расположенных ДР тепловыделяющих сборок обоих типов (рис. 2а). «Средний» фрагмент твэльного пучка начинается от первых идентично расположенных КДР и ДР штатной ТВСА-Т и ТВСА^У (рис 2б). «Верхний» фрагмент начинается от первой отдельно

установленной ПР в ТВСА^У (рис. 2в).

Особенностью ЭМ «нижнего» фрагмента твэльного пучка является симметричность входных условий движения потока, т.е. на входе в ЭМ установлены дистанционирующие решетки единой конструкции для обеих ТВСА (см. рис. 2а). Особенностью ЭМ «среднего» фрагмента твэльного пучка является несимметричность входных условий движения потока, т.е. на входе в ЭМ установлены дистанционирующая и комбинированная дистанционирующая решетки соответствующих топливных сборок (см. рис. 2б). Для ЭМ «верхнего» фрагмента твэльного пучка помимо установленных на входе дистанционирующей и комбинированной дистанционирующей решеток характерно наличие отдельно стоящих перемешивающих решеток (см. рис. 2в).

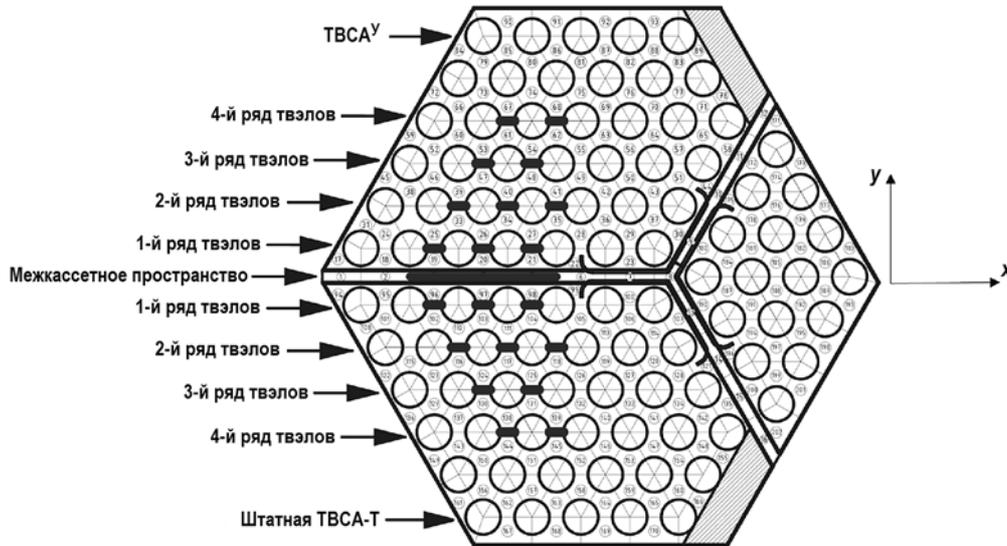


Рис. 3. Схема расположения характерных зазоров в поперечном сечении ЭМ

Методика проведения исследований заключалась в следующем.

1. Для изучения процесса межкассетного перемешивания теплоносителя были выбраны характерные области в поперечном сечении ЭМ, расположенные в зазоре между соседними ТВСА и зазорах между твэлами каждой из тепловыделяющих сборок (рис. 3).

2. Характерные области поперечного сечения ЭМ разбивались на определенное количество зон измерения, в каждой из которых с помощью пневмометрического зонда проводились замеры поля давлений потока в характерных сечениях по длине ЭМ. Области измерения поля давления воздушного потока в продольном сечении ЭМ выделены пунктирной линией (см. рис. 2). Полученное распределение давлений затем пересчитывалось в проекции скорости на координатные оси x , y , z и усреднялись по зазорам между твэлами и межкассетному пространству (см. рис. 3).

3. По полученным данным строились графики распределения составляющих вектора скорости и картограммы распределения осевой скорости в поперечном сечении ЭМ.

Обоснование представительности проведения экспериментального изучения течения потока теплоносителя за решетками-интенсификаторами на исследовательском стенде было изложено в работах [3 – 5].

Экспериментальные исследования проводились при постоянной среднерасходной скорости воздушного потока на входе в ЭМ; данный параметр имеет одинаковую величину для каждой из моделей и составляет $W_{cp} = 27,5$ м/с. Число Рейнольдса

дса, при котором проводились эксперименты, составляло 78000. Температурный диапазон воздушного потока при проведении исследований составлял от 23 до 25°C.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕЖКАССЕТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Анализ результатов экспериментальных исследований позволил выявить общие закономерности течения потока.

1. Поперечные течения теплоносителя на всех фрагментах твэльного пучка имеют схожий характер и следующее распределение поперечных потоков: при обтекании КДР, расположенной в ТВСА-Т, поперечный поток движется в ТВСА^У, а перед ДР и ПР, расположенных в ТВСА^У, поперечный поток направлен в ТВСА-Т. Сформированные таким образом потоки оказывают значительное влияние на движение теплоносителя в соседних топливных кассетах.

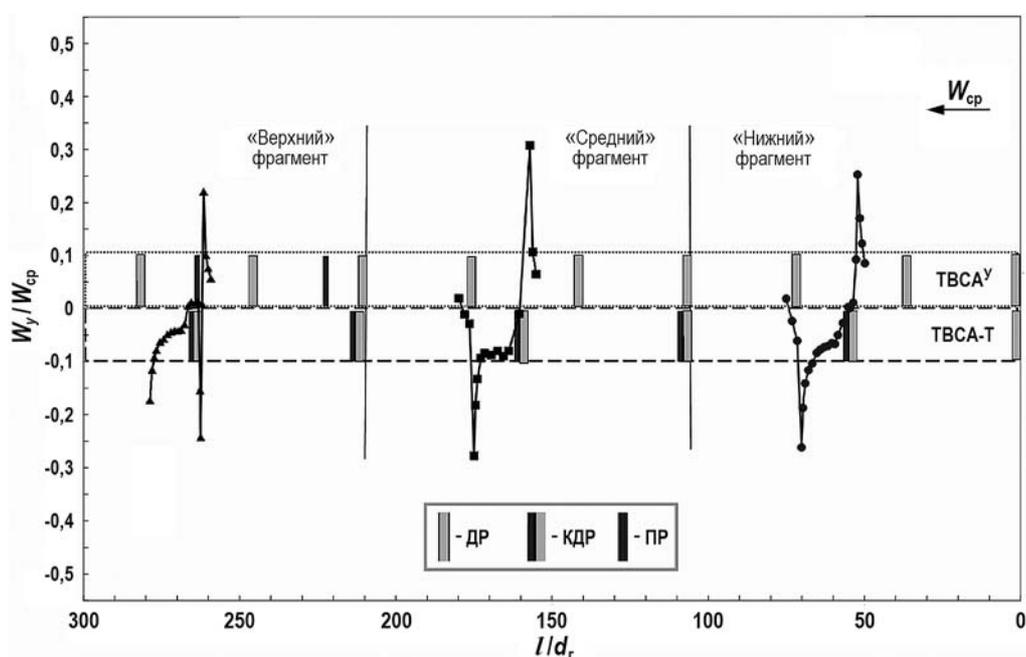


Рис. 4. Распределение поперечной скорости в межкассетном пространстве ($W_{cp} = 27.5$ м/с, $Re = 78000$)

2. В области межкассетного пространства было отмечено:

а) величина поперечной скорости при обтекании потоком КДР и ДР имеет близкие значения и составляет $(W_y/W_{cp}) = 0,3$ для «среднего» фрагмента твэльного пучка и $(W_y/W_{cp}) = 0,25$ для «нижнего» фрагмента (рис. 4); для «верхнего» фрагмента твэльного пучка величина поперечной скорости при обтекании потоком КДР и ДР также имеет близкие значения и составляет $(W_y/W_{cp}) = 0,2$, что несколько меньше, чем на других исследуемых участках (см. рис. 4);

б) перед ПР, расположенной в «верхнем» фрагменте твэльного пучка, поперечный поток движется в ТВСА-Т, значение скорости составляет $(W_y/W_{cp}) = 0,25$. Данное явление характерно только для области межкассетного пространства и не наблюдается в твэльном пучке (рис. 6).

3. В первом ряду твэлов каждой из тепловыделяющих сборок, прилегающем к межкассетному пространству, наблюдается следующее:

а) при обтекании потоком КДР и ДР, расположенных в «нижнем» фрагменте твэльного пучка, значения поперечной скорости одинаковы и составляют $(W_y/W_{cp}) = 0,4$ (см. рис. 5);

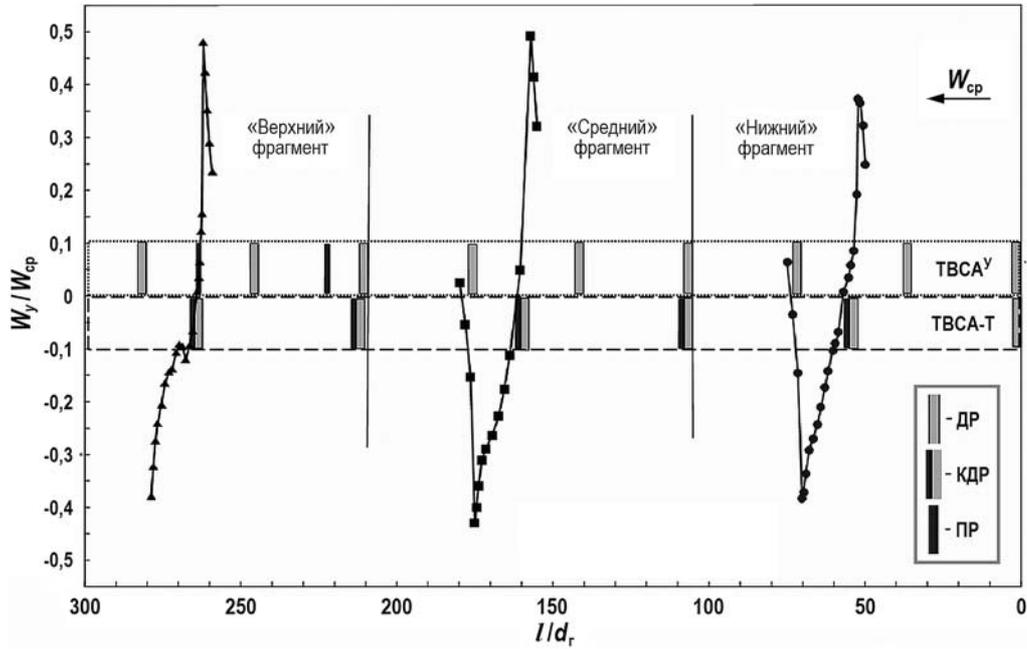


Рис. 5. Распределение поперечной скорости в первых рядах твэлов ТВСА ($W_{cp} = 27.5$ м/с, $Re = 78000$)

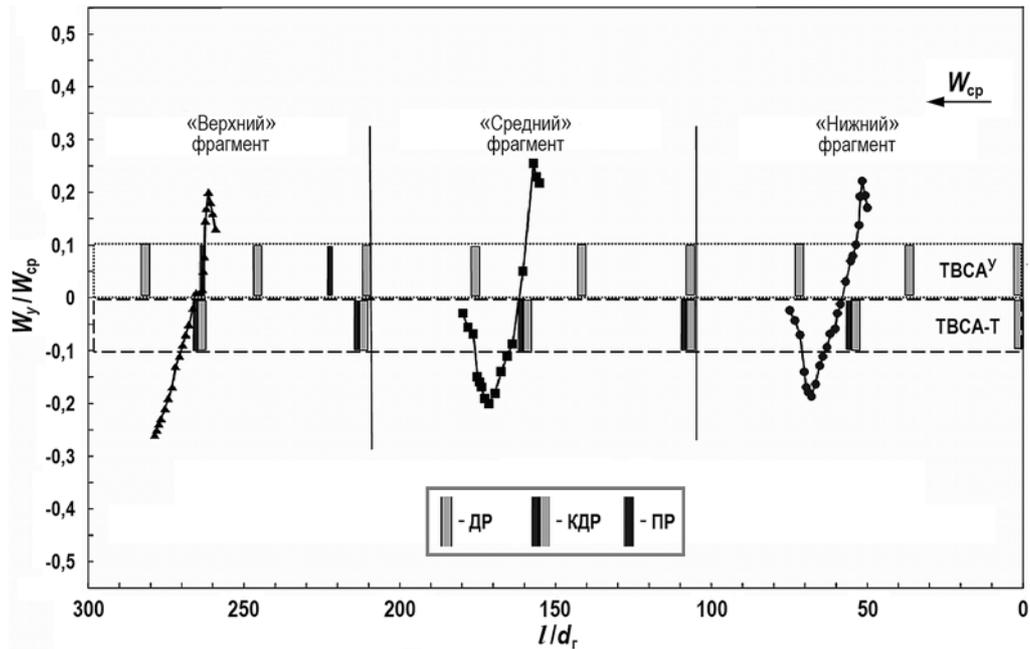


Рис. 6. Распределение поперечной скорости во вторых рядах твэлов ТВСА ($W_{cp} = 27.5$ м/с, $Re = 78000$)

б) наибольшая величина поперечной скорости наблюдается при обтекании потоком КДР, расположенной в «среднем» фрагменте твэльного пучка, значение поперечной скорости составляет $(W_y/W_{cp}) = 0,5$, а при обтекании потоком ДР поперечная скорость имеет близкое значение, равное $(W_y/W_{cp}) = 0,45$ (см. рис. 5);

в) в «верхнем» фрагменте твэльного пучка при обтекании потоком КДР значение поперечной скорости составляет $(W_y/W_{cp}) = 0,47$, а при обтекании ДР поперечная скорость имеет величину $(W_y/W_{cp}) = 0,4$ (см. рис. 5);

г) при движении теплоносителя через «нижний» и «средний» фрагменты твэльного пучка наблюдается рост величины поперечной скорости, а именно, при обтекании потоком КДР и ДР «среднего» фрагмента значения поперечной скорости (W_y/W_{cp}) соответственно на 20 и 10% выше, чем при обтекании потоком решеток на «нижнем» фрагменте (см. рис. 5). В «верхнем» фрагменте твэльного пучка величина поперечной скорости (W_y/W_{cp}) близка к значениям скорости на «среднем» фрагменте.

4. Анализ распространения тангенциальных скоростей теплоносителя в поперечном сечении тепловыделяющих сборок показал следующее:

а) закономерности распределения поперечных течений теплоносителя по длине исследуемых фрагментов твэльного пучка, характерные для ряда твэлов, прилегающего к межкассетному пространству, распространяются на последующие за ним ряды стержней каждой из ТВСА; распространение тангенциальных скоростей потока теплоносителя в поперечном сечении ЭМ ограничиваются третьим или четвертым рядом каждой из сборок в зависимости от исследуемого фрагмента;

б) начиная со второго ряда твэлов величина поперечной скорости (W_y/W_{cp}) при обтекании решеток различных конструкций для всех исследуемых фрагментов уменьшается в два раза (см. рис. 5, 6);

в) в «среднем» фрагменте твэльного пучка глубина распространения поперечных течений теплоносителя в сечении смежных тепловыделяющих сборок одинакова и ограничивается четырьмя рядами твэлов, начиная с пятого ряда твэлов наблюдается турбулентное движение теплоносителя, поперечная скорость имеет значение (W_y/W_{cp}) $\approx (0,1 - 0,05)$;

г) в «нижнем» и «верхнем» фрагментах твэльного пучка распространение поперечных течений теплоносителя в сечении ТВСА ограничивается тремя рядами твэлов, начиная с четвертого ряда твэлов наблюдается турбулентное движение теплоносителя, поперечная скорость имеет значение (W_y/W_{cp}) $\approx (0,1 - 0,05)$.

5. Максимальное значение аксиальной скорости потока на исследуемых фрагментах твэльного пучка реализуется в области трех рядов твэлов, расположенных около межкассетного пространства в момент обтекания потоком поясов КДР и ДР, и составляет (W_z/W_{cp}) $\approx 1,45$.

6. Вследствие наличия гидравлически неидентичных КДР и ДР распределение расхода теплоносителя между соседними топливными кассетами приобретает сильную неравномерность. Максимальное различие расхода теплоносителя между смежными кассетами составляет 38%, наблюдается на среднем фрагменте твэльного пучка и обусловлено наибольшей интенсивностью поперечного потока на данном фрагменте твэльного пучка.

7. Выравнивание расхода теплоносителя между смежными топливными кассетами наблюдается непосредственно перед ДР. Различие расхода теплоносителя между кассетами составляет не более 10%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов исследований процесса перемешивания теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР позволил сделать следующие выводы:

а) на движение теплоносителя в твэльном пучке активной зоны, состоящей из кассет ТВСА различных конструкций, оказывают влияние поперечные потоки, сформированные при обтекании гидравлически неидентичных решеток;

б) в области межкассетного пространства величина поперечной скорости при обтекании потоком комбинированной дистанционирующей и дистанционирующей решеток на «нижнем» и «среднем» фрагментах твэльного пучка соответствующих тепловыделяющих сборок одинакова;

в) максимальная величина поперечной скорости наблюдается при обтекании потоком комбинированной дистанционирующей решетки, расположенной в «среднем» фрагменте твэльного пучка;

г) глубина распространения поперечных течений теплоносителя в сечении тепловыделяющих сборок на «среднем» фрагменте твэльного пучка ограничивается четырьмя рядами твэлов, а на «нижнем» и «верхнем» фрагментах тремя рядами твэлов;

д) при движении теплоносителя через «нижний» и «средний» фрагменты твэльного пучка наблюдается рост величины поперечной скорости потока, в «верхнем» фрагменте рост поперечной скорости отсутствует;

е) выравнивание расхода теплоносителя между соседними тепловыделяющими сборками на «среднем» и «нижнем» фрагментах твэльного пучка наблюдается непосредственно за дистанционирующей решеткой.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 18-19-00473).

Литература

1. Дмитриев С.М., Зверев Д.Л., Бых О.А., Панов Ю.К., Сорокин Н.М., Фарафонов В.А. Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах: учебник. – 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. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2006. – №4. – С. 70-76.
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. – Вып. 1. – С. 11-14.
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. // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2012. – №1. С. 99-108.
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. – Вып. 2. С. 47-55.
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. – Вып. 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. – Вып. 4. С. 111-119.
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. Дмитриев С.М., Варенцов А.В., Добров А.А., Доронков Д.В., Самойлов О.Б., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е. Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в ТВС-Квадрат реакторов PWR с перемешивающими решетками. // Теплоэнергетика. – 2014. – №8. – С. 20-27.
10. 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 ВВЭР300 с целью обоснования их эффективности. // Труды НГТУ им.

Р.Е. Алексеева. 2013. – Вып. 5. С. 197-205.

11. *Дмитриев С.М., Варенцов А.В., Доронков Д.В., Пронин А.Н., Солнцев Д.Н., Хробостов А.Е., Сухарев Ю.П.* Экспериментальные исследования гидродинамики потока теплоносителя за дистанционирующей и перемешивающей решетками ТВСА-12PLUS реактора ВВЭР-1000 // ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов. 2017. – Вып. 1. С. 126-134.

12. *Баринов А.А., Дмитриев С.М., Хробостов А.Е., Самойлов О.Б.* К вопросу о методологии обоснования теплотехнической надежности активных зон водяных энергетических реакторов. // Атомная энергия. – 2016. – Т. 120. – Вып. 5. – С. 270-275.

13. *Герасимов А.В., Дмитриев С.М., Добров А.А., Доронков Д.В., Пронин А.Н., Рязанов А.В., Солнцев Д.Н., Хробостов А.Е.* Расчетно-экспериментальные исследования процессов течения потока теплоносителя в области направляющего канала за перемешивающими решетками ТВС. // Инженерно-физический журнал. – 2020. – Т. 93. Вып 1. – С. 151-160.

14. *Самойлов О.Б., Носков А.С., Шипов Д.Л., Дмитриев С.М., Добров А.А., Доронков Д.В., Легчанов М.А., Пронин А.Н., Солнцев Д.Н., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е.* Гидродинамические особенности течения теплоносителя за перемешивающей дистанционирующей решеткой ТВС-Квадрат реактора PWR. // Теплоэнергетика. – 2019. – Вып. 4. – С. 32-38.

15. *Дмитриев С.М., Доронков Д.В., Пронин А.Н., Солнцев Д.Н., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е.* Расчетно-экспериментальные исследования гидродинамики и массообмена теплоносителя за дистанционирующей решеткой тепловыделяющей сборки реактора плавучего энергоблока. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2014. – № 4. – С. 60-70.

16. *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. – Вып 1. С. 107-113.

17. *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. – Вып. 3. С. 134-143.

18. *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. Вып 3. С. 385-394.

19. *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. – Вып. 5. С. 725-734.

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.

Поступила в редакцию 06.06.2019 г.

Авторы

Дмитриев Сергей Михайлович, ректор, профессор, д-р техн. наук
E-mail: dmitriev@nntu.ru

Герасимов Антон Владимирович, аспирант
E-mail: roorvenom@mail.ru.

Добров Александр Алексеевич, старший преподаватель
E-mail: a.a.dobrov@yandex.ru

Доронков Денис Владимирович, старший преподаватель
E-mail: nevid000@mail.ru

Пронин Алексей Николаевич, старший преподаватель
E-mail: proninaleksei@mail.ru.

Рязанов Антон Владимирович, аспирант
E-mail: a_v_ryazanov@rambler.ru.

Солнцев Дмитрий Николаевич, доцент каф. «АТС», канд. техн. наук
E-mail: dn.solntsev@yandex.ru

Хробостов Александр Евгеньевич, директор ИЯЭ и ТФ, доцент, канд. техн. наук
E-mail: khrobostov@nntu.nnov.ru

Носков Алексей Сергеевич, инженер-конструктор
E-mail: noskov@okbm.nnov.ru

Самойлов Олег Борисович, советник директора, профессор, д-р техн. наук
E-mail: lukanov-ve@okbm.nnov.ru

Швецов Юрий Константинович, инженер-конструктор
E-mail: iurii.shvetsov@okbm.nnov.ru

Шипов Дмитрий Леонидович, начальник бюро, канд. техн. наук
E-mail: noskov@okbm.nnov.ru

UDC 621.039

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE COOLANT FLOW IN THE VVER REACTOR CORE WITH TVSA FUEL ASSEMBLIES

Dmitriev S.M. *, Gerasimov A.V. *, Dobrov A.A. *, Doronkov D.V. *, Pronin A.N. *,
Ryazanov A.V. *, Solntsev D.N. *, Khrobostov A.E. *, Noskov A.S. **,
Samoilov O.B. **, Shvetsov Yu.K. **, Shipov D.L. **

The Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
24 Minin Str., 603950 Nizhny Novgorod, Russia
* AO Afrikantov OKB Mechanical Engineering
15 Burnakovskij proezd, 603074 Nizhny Novgorod, Russia

ABSTRACT

The paper presents the results of an experimental study to investigate the interaction of coolant in adjoining fuel assemblies in the VVER reactor core composed of TVSA-T and upgraded TVSA FAs. The processes of the in-core coolant flow were simulated in a test wind tunnel. The experiments were conducted using models representing different portions of the VVER reactor core fuel bundle and consisted in measuring the radial and axial air flow velocities in characteristic zones within the FAs and in the space between them. The results of the experiments can be translated to the full-scale conditions of the coolant flow with the use of the fluid dynamics simulation theory. The measurements were performed using a five-channel pneumometric probe. The coolant flow pattern in different portions of the fuel bundle is represented by distribution diagrams and maps for the radial and axial velocity vector components in the characteristic zones of the models. An analysis for the spatial distribution of the radial and axial velocity vector components has made it possible to obtain a detailed pattern of the coolant flow about the FA spacer, mixing and combined spacer grids of different designs. The accumulated database for the coolant flow in FAs of different designs forms the basis for the engineering justification of the VVER reactor core reliability and serviceability. The investigation results for the interaction of coolant in adjoining TVSA FAs of different designs have been adopted for the practical use at JSC Afrikantov OKB to estimate the heat engineering reliability of the VVER reactor cores

and have been included in the database for verification of computational fluid dynamics (CFD) codes and detailed by-channel calculation codes.

Key words: reactor core, fuel assembly, spacer grids, mixing grids, interassembly interaction, coolant fluid dynamics.

REFERENCES

1. Dmitriev S.M., Zverev D.L., Byh O.A., Panov Yu.K., Sorokin N.M., Farafonov V.A. *Basic equipment of nuclear power plants with thermal neutron reactors*. Moscow. Mashinostroenie Publ., 2013, 415 p. (in Russian).
2. Borodin S.S., Dmitriev S.M., Legchanov M.A., Hrobostov A.E., Samojlov O.B., Sorokin N.M. Peculiarities of coolant hydrodynamics in alternative fuel assemblies of VVER-1000 reactors using mixing grids. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2006, no. 4, pp. 70-76 (in Russian).
3. Samojlov O.B., Kupriyanov A.V., Fal'kov A.A., Shipov D.L., Molodcov A.A., Luk'yanov V.E. Experimental studies of thermotechnical characteristics of TVSA with mixing lattices. *Atomnaya Energiya*. 2014, v. 116, iss. 1, pp. 11-14 (in Russian).
4. Dmitriev S.M., Luk'yanov V.E., Samojlov O.B. Justification of the correlation for calculating the critical heat flux in fuel assemblies of an alternative design with stirring intensifier grids for VVER-1000. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2012, no. 1, pp. 99-108 (in Russian).
5. Samojlov O.B., Shipov D.L., Fal'kov A.A., Bogryakov V.G., Sorokin N.M., Dmitriev S.M. Thermal-hydraulic and hydrodynamic studies of the characteristics of TVSS of an alternative design of VVER-1000. *VANT. Ser. Fizika Yadernykh Reaktorov*. 2004, iss. 2, pp. 47-55 (in Russian).
6. Samojlov O.B., Kuul' V.S., Preobrazhenskij D.G. Results of the creation and development of fuel assemblies of an alternative design for the VVER-1000 reactor. *VANT. Ser. Materialovedenie i Novye Materialy*. 2005, iss. 1, p. 126 (in Russian).
7. Samojlov O.B., Fal'kov A.A., Morozkin O.N., Luk'yanov V.E. Refinement of the methodology for accounting for deviations of local parameters when justifying the thermotechnical reliability of the core from TVSA VVER-1000. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*. 2010, iss. 4, pp. 111-119 (in Russian).
8. Dmitriev S.M., Borodin S.S., Legchanov M.A., Solncev D.N., Sorokin V.D., Hrobostov A.E. Experimental studies of hydrodynamic and mass transfer characteristics of the coolant flow in VVER fuel assemblies. *Atomnaya Energiya*. 2012, v. 113, iss. 5, pp. 252-257 (in Russian).
9. Dmitriev S.M., Varencov A.V., Dobrov A.A., Doronkov D.V., Samojlov O.B., Sorokin V.D., Hrobostov A.E. Computational and experimental studies of local hydrodynamics and mass exchange of the coolant flow in TVS-Kvadrat PWR reactors with mixing grids. *Teploenergetika*. 2014, no. 8, pp. 20-27 (in Russian).
10. Dmitriev S.M., Varencov A.V., Dobrov A.A., Doronkov D.V., Legchanov M.A., Hrobostov A.E. Investigation of the coolant mass transfer behind the mixing grids of the fuel assemblies of the VBER 300 reactors in order to substantiate their efficiency. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*. 2013, iss. 5, pp. 197-205 (in Russian).
11. Dmitriev S.M., Varencov A.V., Doronkov D.V., Pronin A.N., Solncev D.N., Hrobostov A.E., Suharev Yu.P. Experimental studies of the hydrodynamics of the coolant flow behind the TVSA-12PLUS spacer and mixing grids of the VVER-1000 reactor. *VANT. Ser. Fizika Yadernykh Reaktorov*. 2017, iss. 1, pp. 126-134 (in Russian).
12. Barinov A.A., Dmitriev S.M., Hrobostov A.E., Samojlov O.B. On the question of the methodology of substantiating the thermal engineering reliability of the active zones of WPRs. *Atomnaya Energiya*. 2016, v. 120, iss. 5, pp. 270-275 (in Russian).
13. Gerasimov A.V., Dmitriev S.M., Dobrov A.A., Doronkov D.V., Pronin A.N., Ryazanov A.V., Solncev D.N., Hrobostov A.E. Computational and experimental studies of the processes of the coolant flow in the region of the guide channel behind the mixing grids of fuel assemblies. *Inzhenerno-Fizicheskiy Zhurnal*. 2020, v. 93, iss. 1, pp. 151-160 (in Russian).
14. Samojlov O.B., Noskov A.S., Shipov D.L., Dmitriev S.M., Dobrov A.A., Doronkov D.V., Legchanov M.A., Pronin A.N., Solncev D.N., Sorokin V.D., Hrobostov A.E. Hydrodynamic features of the coolant flow behind the mixing spacer grid TVS-Kvadrat PWR reactor.

Teploenergetika. 2019, iss. 4, pp. 32-38 (in Russian).

15. Dmitriev S.M., Doronkov D.V., Pronin A.N., Solncev D.N., Sorokin V.D., Hrobostov A.E. Computational and experimental studies of the hydrodynamics and mass transfer of the coolant behind the spacer grid of the fuel assembly of the reactor of a floating power unit. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2014, no. 4, pp. 60-70 (in Russian).

16. Varencov A.V., Doronkov D.V., Kupricheva E.S., Solncev D.N., Sorokin V.D. Experimental studies of local mass transfer and the efficiency of mixing the coolant with spacer grids in fuel assemblies of the KLT-40S reactor. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*. 2012, iss. 1, pp. 107-113 (in Russian).

17. Varencov A.V., Doronkov D.V., Ilyutina E.M., Karatushina I.V., Sorokin V.D., Hrobostov A.E. Peculiarities of the coolant flow in TVS-Kvadrat of the PWR reactor when setting up stirring spacers with different types of deflectors. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*. 2015, iss. 3, pp. 134-143 (in Russian).

18. Dmitriev S.M., Doronkov D.V., Legchanov M.A., Pronin A.N., Solncev D.N., Sorokin V.D., Hrobostov A.E. Investigation of hydrodynamic characteristics and features of the coolant flow behind the spacer grid of the fuel assembly of the reactor of a floating power unit. *Teplofizika i Aeromekhanika*. 2016, v. 23, iss. 3, pp. 385-394 (in Russian).

19. Dmitriev S.M., Dobrov A.A., Doronkov D.V., Pronin A.N., Solncev D.N., Sorokin V.D., Hrobostov A.E. Study of hydrodynamic processes of coolant flow in TVS-Kvadrat PWR reactor with various mixing spacers. *Teplofizika i Aeromekhanika*. 2018, v. 25, iss. 5, pp. 725-734 (in Russian).

20. Dmitriev S.M., Dobrov A.A., Legchanov M.A., Hrobostov A.E. Application of a multichannel pneumometric probe to study the velocity profile of a coolant in models of fuel cassettes of nuclear reactors. *Pribory i Metody Izmereniy*. 2015, v. 6, iss. 2, pp. 188-195 (in Russian).

Authors

Dmitriev Sergey Mikhailovich, Rector, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: dmitriev@nntu.ru

Gerasimov Anton Vladimirovich, PhD Student

E-mail: poorvenom@mail.ru

Dobrov Alexander Alekseevich, Senior Lecturer

E-mail: a.a.dobrov@yandex.ru

Doronkov Denis Vladimirovich, Senior Lecturer

E-mail: nevid000@mail.ru

Pronin Alexey Nicolaevich, Senior Lecturer

E-mail: pronin aleksei@mail.ru

Ryazanov Anton Vladimirovich, PhD Student

E-mail: a_v_ryazanov@rambler.ru

Solntsev Dmitry Nicolaevich, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: dn.solntsev@yandex.ru

Khrobostov Aleksandr Yevgenyevich, Director, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: khrobostov@nntu.ru

Noskov Aleksey Sergeevich, Design Engineer

E-mail: noskov@okbm.nnov.ru

Samoylov Oleg Borisovich, Adviser to Director, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: lukyanov-ve@okbm.nnov.ru

Shvetsov Yury Konstantinovich, Design Engineer

E-mail: iurii.shvetsov@okbm.nnov.ru

Shipov Oleg Borisovich, Head of Department, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: noskov@okbm.nnov.ru