

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.039

С.М. Дмитриев, Д.В. Доронков, М.А. Легчанов, Д.Н. Солнцев, А.Н. Пронин,
Е.В. Рубцова, А.В. Герасимов, Ю.А. Глухова, А.В. Рязанов

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА МЕЖКАССЕТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В СМЕШАННОЙ АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА ВВЭР

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты экспериментальных исследований локальной гидродинамики потока теплоносителя в смешанной активной зоне реактора ВВЭР, состоящей из ТВСА-Т и ТВСА-Т.mod.2. Моделирование процессов течения потока теплоносителя в пучке твэлов проводилось на аэродинамическом стенде. Исследования осуществлялись на модели фрагмента смешанной активной зоны реактора ВВЭР, состоящей из одного сегмента ТВСА-Т и двух ТВСА-Т.mod.2. Измерение поля давлений потока проводилось пятиканальным пневмометрическим зондом.

Проведен анализ пространственного распределения проекций скорости потока теплоносителя, выявлены закономерности обтекания теплоносителем дистанционирующих, перемешивающих и комбинированных дистанционирующих решеток ТВСА. Определены величины поперечных потоков теплоносителя, вызванных обтеканием гидравлически неидентичных решеток и установлена их локализация в продольном и поперечном сечениях экспериментальной модели. Выявлен эффект накопления гидродинамических возмущений потока в продольном и поперечном сечениях модели, вызванный шахматным расположением гидравлически неидентичных решеток. Результаты исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя между соседними ТВСА-Т и ТВСА-Т.mod.2 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 детального поячеечного расчета активной зоны реакторов ВВЭР.

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

Введение

Во время последней частичной перегрузки активной зоны реактора ВВЭР второго энергоблока АЭС «Темелин» (Чехия) были загружены тепловыделяющие сборки новой модификации ТВСА-Т.mod.2, пришедшие на замену штатным ТВСА-Т [1]. Разработку конструкции обеих топливныхборок производило АО «ОКБМ Африкантов» (Россия, г. Нижний Новгород).

По сравнению с тепловыделяющими сборками ТВСА-Т, основным отличием конструкции усовершенствованной ТВСА является применение отдельно стоящих перемешивающих решеток (ПР), которые обеспечивают более интенсивное перемешивание теплоносителя в поперечном сечении сборки и повышение критических тепловых потоков, что в свою очередь позволило улучшить эксплуатационные характеристики новой кассеты. Поскольку оба типа ТВСА являются бесчехловыми, перемешивание теплоносителя происходит не только в пределах одной кассеты, но и между соседними сборками. Данное явление необходимо учитывать в процессе обоснования теплотехнической надежности активной зоны [2], что обусловило необходимость проведения комплексных исследований процесса

межкассетного взаимодействия теплоносителя, между соседними ТВСА различных конструкций в смешанной активной зоне реактора ВВЭР.

Экспериментальный стенд

Моделирование течения теплоносителя в активной зоне производилось на аэродинамическом стенде в лаборатории «Реакторная гидродинамика» НГТУ им. Р.Е. Алексеева [3-6]. 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 $K_f = 4,4$.

Экспериментальные модели включали в себя сегменты сборок ТВСА-Т.mod.2, ТВСА-Т и межкассетное пространство (рис. 1а). Пояс дистанционирующей решетки (ДР), представленный на рис. 1б, состоит из пружинистых элементов, расположенных по треугольной решетке и объединенных стальным ободом. Комбинированная дистанционирующая решетка (КДР) ТВСА-Т, представленная на рисунке 1в, снабжена турбулизирующими дефлекторами, размещенными согласно схеме «закрутка вокруг твэла», угол отгиба дефлекторов составляет 38° . Пояс перемешивающей решетки (ПР), представленный на рис. 1г, снабжен турбулизирующими дефлекторами с углом отгиба в 30° и размещенными согласно схеме «порядная прогонка». Все пояса решеток снабжены имитаторами зубчатого края обода.

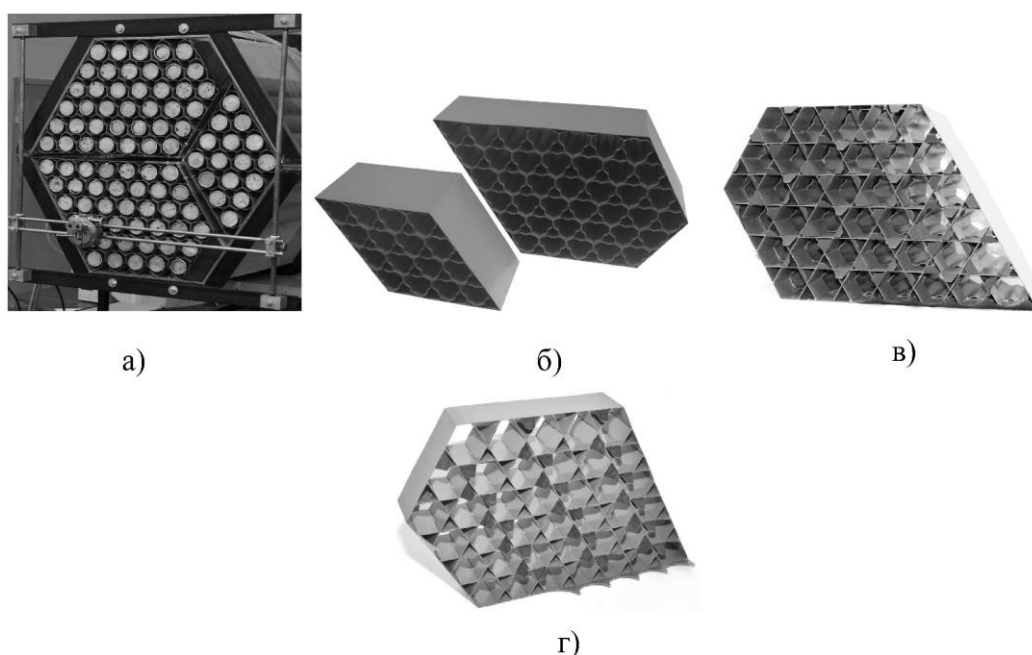


Рис. 1. ЭМ и пояса решеток топливных кассет:

- а) ЭМ фрагмента активной зоны реактора ВВЭР;
- б) пояс ДР ТВСА-Т.mod.2 и ТВСА-Т;
- в) пояс КДР ТВСА-Т; г) пояс ПР ТВСА-Т.mod.2

Измерительный комплекс

Измерение поля давлений потока теплоносителя производилось пятиканальным пневмометрическим зондом. Датчик выполнен в виде пяти стальных капилляров, расположенных в двух перпендикулярных друг к другу диаметральных плоскостях. Полученное поле давлений потока в окрестности чувствительной части зонда согласно

зависимостям, полученным при тарировке, пересчитывалось в направление и величину вектора скорости теплоносителя в месте его позиционирования [5]. Зонд выполнен таким образом, чтобы не вносить возмущения в поток и не искажать направление течения теплоносителя. Погрешность определения составляющих вектора скорости не превышает 7 %. Снятие показаний с зонда осуществлялось преобразователем давления САПФИР-22Р. Данные приборы имеют допустимый предел основной погрешности $\pm 0,25$ %.

Методика проведения исследований

Изучение процесса межкассетного взаимодействия теплоносителя проводилось на трех фрагментах твэльного пучка смешанной активной зоны (рис. 2).

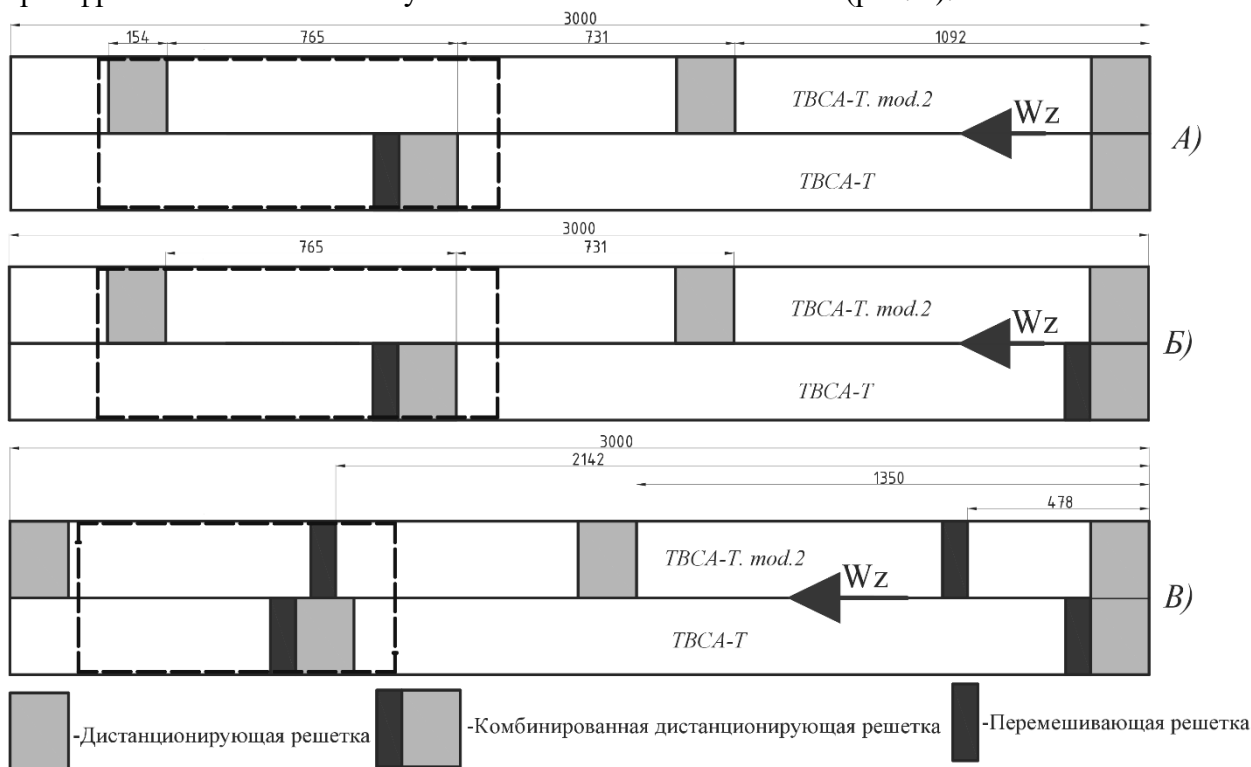


Рис. 2. Схема расположения решеток в различных фрагментах твэльного пучка ТВСА:

- а) нижний фрагмент твэльного пучка;
- б) средний фрагмент твэльного пучка;
- г) верхний фрагмент твэльного пучка

Характерной особенностью ЭМ нижнего фрагмента твэльного пучка является симметричность входных условий течения потока, т.е., на входе в ЭМ установлены ячейковые дистанционирующие решетки единой конструкции для обеих ТВСА (рис. 2а). Особенностью ЭМ среднего фрагмента твэльного пучка является несимметричность входных условий течения потока, то есть на входе в ЭМ установлены ячейковая дистанционирующая решетка и комбинированная дистанционирующая решетка (рис. 2б). Для ЭМ верхнего фрагмента твэльного пучка, помимо несимметричности входных условий течения потока, характерно наличие отдельно стоящих перемешивающих решеток (рис. 2в).

Методика проведения исследований заключалась в следующем.

1. Для изучения процесса межкассетного взаимодействия потока были выбраны характерные области в поперечном сечении ЭМ, представленном на рис. 3;
2. Далее характерные области 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 (рис. 2). Полученное распределение давлений затем пересчитывалось в проекции

скорости на координатные оси X, Y, Z и осреднялись по зазорам между твэлами и межкассетному пространству (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 представлено в работах [9-10].

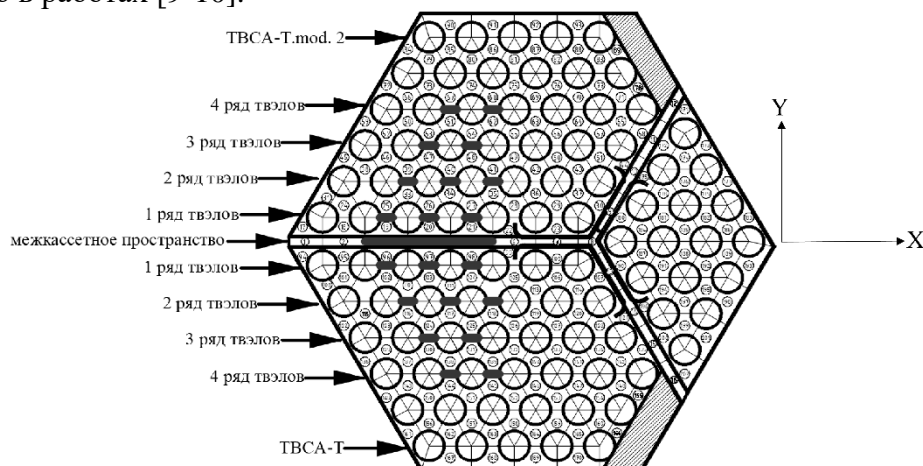


Рис. 3. Схема расположения характерных зазоров в поперечном сечении ЭМ

Результаты исследований межкассетного взаимодействия потока теплоносителя

Анализ результатов экспериментальных исследований позволил выявить общие закономерности течения потока и сделать следующие выводы.

1. В процессе обтекания теплоносителем гидравлически неидентичных, расположенных на разных уровнях дистанционирующих, комбинированных дистанционирующих и перемешивающих решеток (рис. 2), в смежных ТВСА различных конструкций возникают поперечные потоки высокой интенсивности, оказывающие значительное влияние на течение теплоносителя в соседних топливных кассетах. Движение теплоносителя на исследуемых участках носит следующий характер: при обтекании потоком КДР, расположенной в ТВСА-Т, поперечный поток движется в ТВСА-Т.mod.2, а перед ДР и ПР, расположенных в ТВСА-Т.mod.2, поперечный поток направлен в ТВСА-Т.
2. В области межкассетного пространства отмечено, что величина поперечной скорости при обтекании потоком КДР и ДР на каждом из фрагментов твэльного пучка имеет близкие значения и составляет $(w_y/\bar{w})=0,3$ для среднего фрагмента, $(w_y/\bar{w})=0,25$ для нижнего фрагмента и $(w_y/\bar{w})=0,2$ для верхнего фрагмента (рис. 4). Данные величины поперечной скорости потока примерно в 2 раза меньше, чем в твэльном пучке смежных ТВСА, что обусловлено наличием в межкассетном зазоре потока теплоносителя с высокими аксиальными скоростями, который оказывает демпфирующее воздействие на поперечный поток теплоносителя между соседними ТВСА, заключающееся в уносе части поперечного потока массы в продольном направлении.
3. При обтекании теплоносителем ПР, расположенной в верхнем фрагменте твэльного пучка в ТВСА-Т.mod.2, в межкассетном пространстве образуется поперечный поток, направленный в ТВСА-Т, значение поперечной скорости составляет

$(w_y/\bar{w})=0,25$ (рис. 4). Данное явление характерно только для области межкассетного пространства и не наблюдается в твэльном пучке кассет, поскольку ПР находится на одном уровне с КДР, обод которой блокирует поперечный поток.

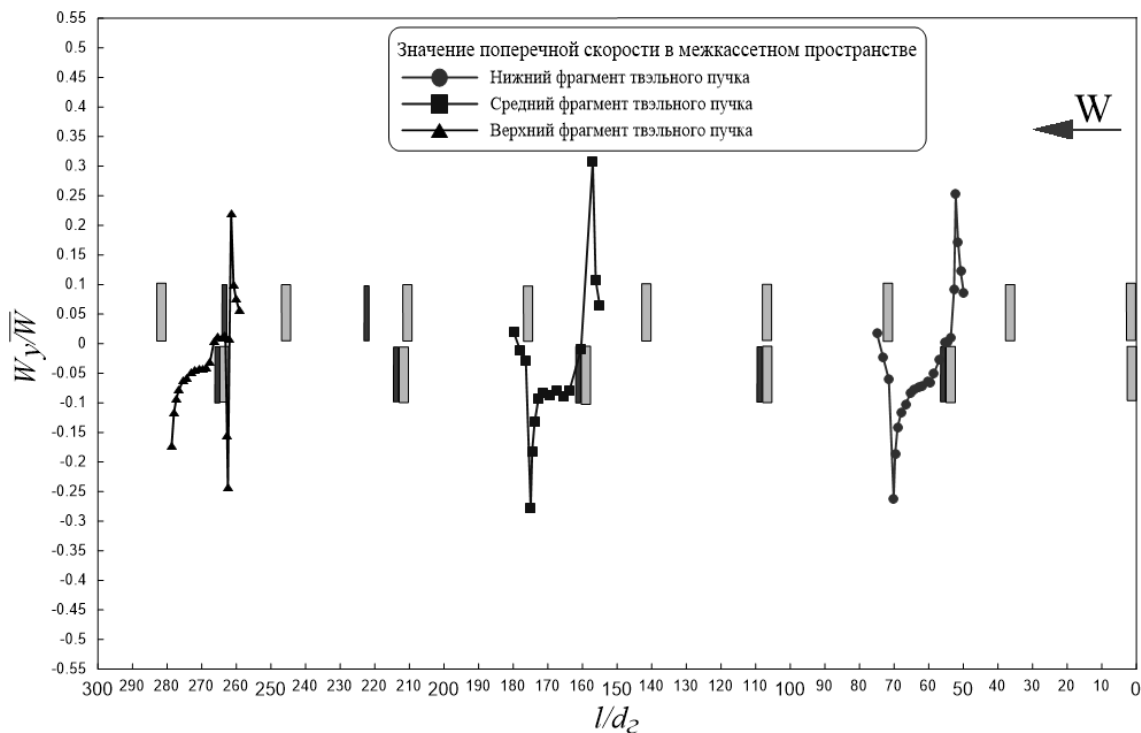


Рис. 4. Распределение поперечной скорости в межкассетном пространстве
($\bar{w} = 27,5$ м/с, $Re = 78\ 000$)

4. В ряду твэлов, прилегающего к межкассетному пространству, отмечено:
- при обтекании потоком КДР и ДР, расположенных в нижнем фрагменте твэльного пучка, значения поперечной скорости одинаковы и составляют $(w_y/\bar{w})=0,4$ (рис. 5);
 - наибольшая интенсивность поперечного потока теплоносителя наблюдается при обтекании потоком КДР, расположенной в среднем фрагменте твэльного пучка, значение поперечной скорости составляет $(w_y/\bar{w})=0,5$, а при обтекании теплоносителем ДР, расположенной на том же фрагменте, поперечная скорость имеет близкое значение $(w_y/\bar{w})=0,45$ (рис. 5);
 - в верхнем фрагменте твэльного пучка при обтекании потоком КДР и ДР значение поперечной скорости составляет $(w_y/\bar{w})=0,47$, и $(w_y/\bar{w})=0,4$ соответственно (рис. 5). Данные значения поперечных скоростей близки к результатам, полученным на среднем фрагменте твэльного пучка, что может быть обусловлено наличием перемешивающих решеток;
 - при движении теплоносителя через нижний и средний фрагменты твэльного пучка наблюдается процесс накопления гидродинамических возмущений потока, который выражается ростом величины поперечной скорости, а именно при обтекании потоком КДР и ДР среднего фрагмента твэльного пучка значения поперечной скорости (w_y/\bar{w}) соответственно на 20 % и 10 % выше, чем при обтекании потоком решеток тех же конструкций на нижнем фрагменте (рис. 5). В свою очередь в верхнем фрагменте твэльного пучка эффект накопления гидродинамических возмущений

потока не наблюдается, величина поперечной скорости (w_y / \bar{W}) близка к значениям скорости на среднем фрагменте, что может быть обусловлено наличием перемешивающих решеток (рис. 5).

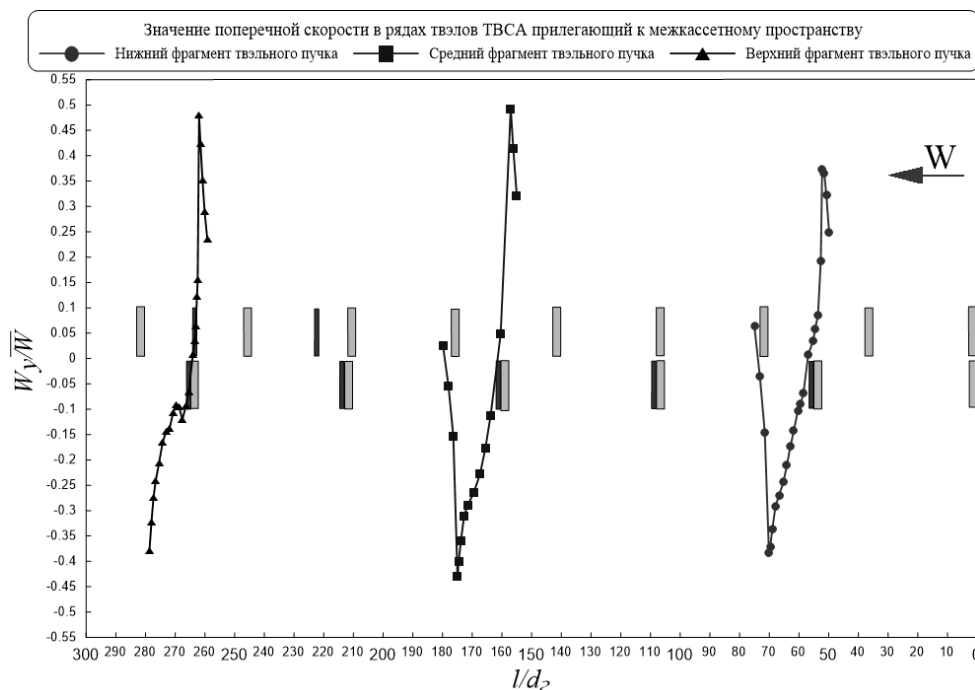


Рис. 5. Распределение поперечной скорости в твэльном пучке кассет ($\bar{W} = 27,5$ м/с, $Re = 78\ 000$)

5. Анализ распространения гидродинамических возмущений теплоносителя в поперечном сечении топливных сборок показал следующее:
- начиная со второго ряда твэлов, величина поперечной скорости (w_y / \bar{W}) при обтекании решеток различных конструкций для всех исследуемых фрагментов уменьшается в 2 раза (рис. 6);
 - закономерности накопления возмущений потока теплоносителя по длине исследуемых фрагментов твэльного пучка, характерные для ряда твэлов, прилегающего к межкассетному пространству, распространяются и на последующие ряды твэлов;
 - распространение гидродинамических возмущений потока в поперечном сечении сборок изменяется в зависимости от исследуемого фрагмента твэльного пучка, а именно: в нижнем фрагменте распространение возмущений потока ограничивается третьим рядом твэлов, в среднем фрагменте четвертым рядом и в верхнем фрагменте пятым рядом;
 - начиная с шестого ряда твэлов, на всех исследуемых участках твэльного пучка наблюдается турбулентное движение теплоносителя, поперечная скорость имеет значение (w_y / \bar{W}) $\approx 0,05$.

Таким образом, процесс накопления гидродинамических возмущений потока теплоносителя наблюдается, как по длине твэльного пучка, исследуемого фрагмента активной зоны, так и в поперечном сечении топливных кассет ТВСА.

- На нижнем и среднем фрагментах твэльного пучка в области поясов исследуемых решеток наблюдается интенсивное перераспределение осевого потока в рядах твэлов, расположенных около межкассетного пространства. Данное перераспределение потока характеризуется локальным ростом величины осевой скорости теплоносителя в одном из сегментов кассет ТВСА, в сторону которого направлен попереч-

ный поток, формирующийся в процессе обтекания решеток с различным гидравлическим сопротивлением (рис. 7 а, б). Значение осевой скорости в данных областях находится в диапазоне $(W_z/\bar{W}) \approx (1,3 \div 1,5)$. Наименьшее значение осевой скорости $(W_z/\bar{W}) \approx (0,6 \div 0,9)$ на всех исследуемых участках наблюдается непосредственно за поясами КДР.

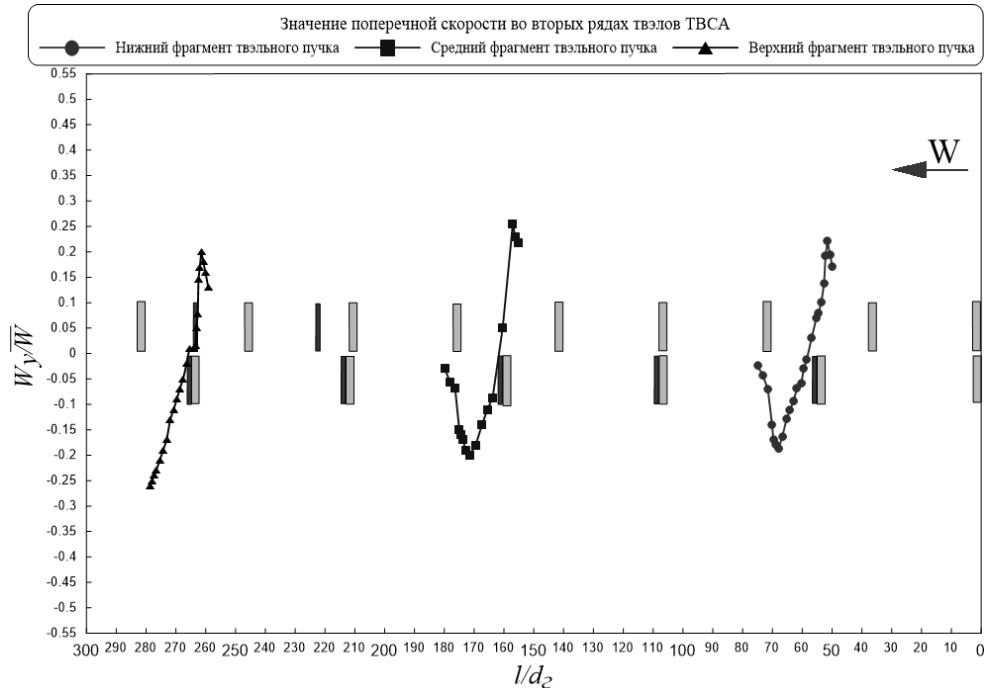


Рис. 6. Распределение поперечной скорости в твэльном пучке кассет ($\bar{W} = 27,5$ м/с, $Re = 78000$)

7. Распределение локальных максимумов осевой скорости в поперечном сечении исследуемых ТВСА совпадает с глубиной распространения гидродинамических возмущений потока теплоносителя, т.е., на нижнем фрагменте твэльного пучка локальный максимум осевой скорости потока распространяется на три ряда твэлов, а на среднем фрагменте твэльного пучка на четыре ряда твэлов (рис. 7 а, б).

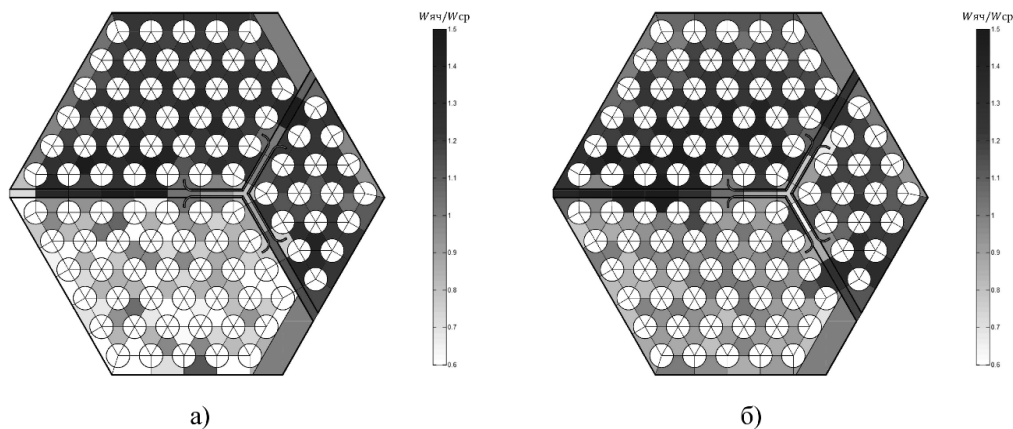


Рис. 7. Картограмма распределения осевой скорости по ячейкам ЭМ:

- а) распределение осевой скорости непосредственно за КДР на нижнем фрагменте твэльного пучка;
 б) распределение осевой скорости непосредственно за КДР на среднем фрагменте твэльного пучка
 ($\bar{W} = 27,5$ м/с, $Re = 78000$)

8. Вследствие наличия гидравлически неидентичных решеток распределение расхода теплоносителя между соседними топливными кассетами приобретает сильную неравномерность. Максимальное различие осевого расхода теплоносителя между смежными кассетами составляет 38 %, наблюдается на среднем фрагменте твэльного пучка и обусловлено наибольшей интенсивностью поперечного потока в данной области. Выравнивание расхода теплоносителя между смежными топливными кассетами наблюдается непосредственно перед ДР. Различие расхода теплоносителя между кассетами составляет не более 10 %. Схожая картина распределения осевого расхода потока теплоносителя наблюдается и на нижнем фрагменте твэльного пучка (рис. 8).

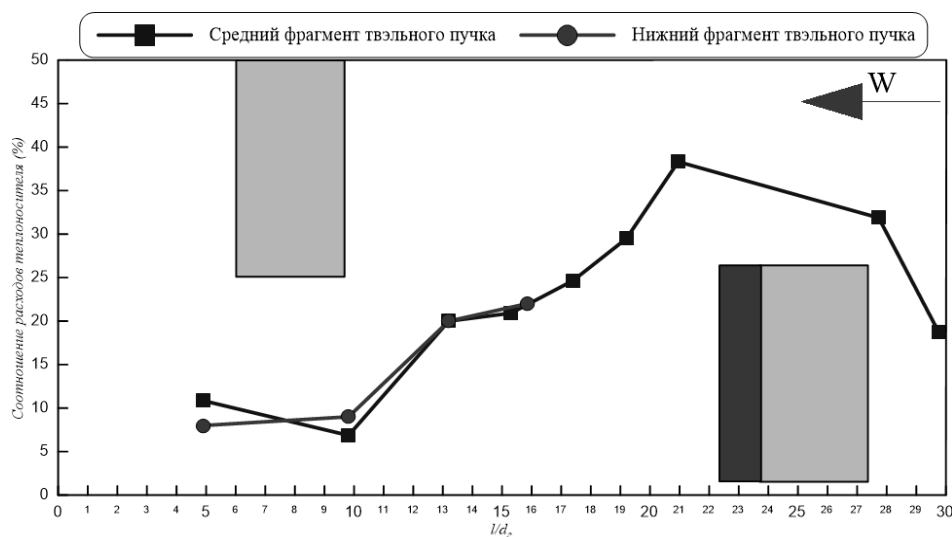


Рис. 8. Соотношение расходов теплоносителя между ТВСА-Т и ТВСА-Т.mod.2 ($\bar{W} = 27,5$ м/с, $Re = 78000$)

Заключение

Анализ результатов исследований процесса межкассетного взаимодействия теплоносителя между ТВСА различных конструкций позволил сделать следующие выводы:

- на движение теплоносителя в твэльном пучке смешанной активной зоны реактора ВВЭР значительное влияние оказывают поперечные потоки, сформированные при обтекании гидравлически неидентичных решеток;
- в области межкассетного пространства величина поперечной скорости при обтекании потоком комбинированной дистанционирующей и дистанционирующей решеток на всех исследуемых фрагментах твэльного пучка кассет одинакова;
- максимальная величина поперечной скорости наблюдается при обтекании потоком комбинированной дистанционирующей решетки, расположенной в среднем фрагменте твэльного пучка;
- при движении теплоносителя через нижний и средний фрагменты твэльного пучка наблюдается процесс накопления возмущений потока, который выражается ростом величины поперечной скорости, в свою очередь в верхнем фрагменте твэльного пучка эффект накопления возмущений потока отсутствует;
- распространения возмущений потока в поперечном сечении сборок изменяется в зависимости от исследуемого фрагмента твэльного пучка, а именно: в нижнем фрагменте твэльного пучка распространение возмущений потока ограничивается третьим рядом твэлов, в среднем фрагменте твэльного пучка четвертым рядом твэлов и в верхнем фрагменте твэльного пучка пятым рядом твэлов;

- е) процесс накопления гидродинамических возмущений потока теплоносителя наблюдается, как по длине твэльного пучка, исследуемого фрагмента активной зоны, так и в поперечном сечении топливных кассет;
- ж) распределение локальных максимумов осевой скорости в поперечном сечении исследуемых ТВСА совпадает с глубиной распространения гидродинамических возмущений потока теплоносителя;
- и) максимальное различие осевого расхода теплоносителя между смежными кассетами составляет 38 %, наблюдается на среднем фрагменте твэльного пучка и обусловлено наибольшей интенсивностью поперечного потока в данной области.

Работа выполнена в рамках выполнения базовой части государственного задания № 13.8823.2017/8.9, а также при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации в рамках научного проекта МК-2398.2018.8.

Библиографический список

1. **Дмитриев, С.М.** Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах / С.М. Дмитриев, Д.Л. Зверев, О.А. Бых, Ю.К. Панов, Н.М. Сорокин, В.А. Фарафонов. – М.: Машиностроение, 2013. – 415 с.
2. **Дмитриев, С.М.** К вопросу о методологии обоснования теплотехнической надежности активных зон водяных энергетических реакторов / С.М., Дмитриев, А.А. Баринин, В.Е. Бородин, А.Е. Хробостов // Атомная энергия. – 2016. – Т. 120. Вып. 5. – С. 270-275.
3. **Дмитриев, С.М.** Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР / С.М. Дмитриев, С.С. Бородин, М.А. Легчанов, Д.Н. Солнцев, В.Д. Сорокин, Е.А. Хробостов // Атомная энергия. – 2012. – Т. 113. – Вып. 5. – С. 252-257.
4. **Дмитриев, С.М.** Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в ТВС-Квадрат реакторов PWR с перемешивающими решетками / С.М. Дмитриев, О.Б. Самойлов, А.Е. Хробостов, А.В. Варенцов, А.А. Добров, Д.В. Доронков, В.Д. Сорокин // Теплоэнергетика. – 2014. – №8. – С. 20-27.
5. **Дмитриев, С.М.** Применение многоканального пневмометрического зонда для исследования профиля скорости теплоносителя в моделях топливных кассет ядерных реакторов / С.М. Дмитриев, А.А. Добров, М.А. Легчанов, А.Е. Хробостов // Приборы и методы измерений. – 2015 – Т. 6. – Вып. 2. – С. 188-195.
6. **Самойлов, О.Б.** Теплогидравлические характеристики усовершенствованного топлива ВВЭР на базе ТВСА с перемешивающими решетками-интенсификаторами / О.Б. Самойлов, А.А. Фальков, Д.Л. Шипов, В.Е. Лукьянов, О.Н. Морозкин // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2016. – Вып. 3, 3:5.
7. **Марков, П.** Поперечный перенос и теплообмен в пучке гладкостержневых твэлов ВВЭР с сотовой дистанционирующей решеткой / П. Марков, В.И. Солонин // Атомная энергия. – 2018. – Т. 125, – № 3. – С. 154-158.
8. **Juklíček, Jakub** Cfd analysis of the spacer grids and mixing vanes effect on the flow in a chosen part of the tvsa-t fuel assembly / Jakub Juklíček, Václav Železnýb// Czech Technical University in Prague, – 2015.
9. **Гухман, А.А.** Введение в теорию подобия / А.А. Гухман [и. др.] – М.: Высшая школа. – 1973. – 296 с.

*Дата поступления
в редакцию: 28.10.2019*

**S.M. Dmitriev, D.V. Doronkov, M.A. Legchanov, D.N. Solntsev, A.N. Pronin,
E.V. Rubtsova, A.V. Gerasimov, Y.A. Glukhova., A.V. Ryazanov**

**INVESTIGATION OF INTERASSEMBLY INTERACTION OF COOLANT
IN THE MIXED CORE OF THE WWER**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: Experimental investigation of the coolant flow local hydrodynamics in the mixed core of the WWER reactor, consisting of TVSA-T and TVSA T.mod.2.

Methodology: Process simulation of the coolant flow in the fuel rod bundle was carried out on an aerodynamic test facility. The research were carried out on the model of a fragment of the mixed WWER reactor core, consisting of one TVSA – T segment and two TVSA T.mod.2 segments. Measurement of the flow pressure field was carried out using a five-channel pneumometric probe. The obtained field of flow pressures, according to the dependences obtained during calibration, were recalculated in the direction and magnitude of the coolant velocity vector. To obtain an exact data of the flow, a characteristic area of the cross-section of the model was selected. This characteristic area including the space cross flow between fuel assemblies and four rows of fuel rods of each of the fuel assemblies of the TVSA.

Findings: As part of the implementation of this study, an analysis of the spatial distribution of the projections of the flow rate of the coolant was made. This analysis made it possible to identify the patterns of flow around the heat carrier of the spacing, mixing and combined spacing grids of TVSA. The values of the transverse flow fluids caused by the flow of hydraulically non-identical grids were determined and their localization in the longitudinal and transverse sections of the experimental model was identified. More of that, the effect of accumulation of hydrodynamic flow disturbances in the longitudinal and cross sections of the model, caused by the staggered arrangement of hydraulically non-identical grids, was determined.

Value: The results of a investigation of the coolant cross flow between fuel assemblies interaction are accepted for practical use at JSC «OKBM Afrikantov» for assessing the heat engineering reliability of the WWER reactor core. In addition results were included in the database for verification of computational fluid dynamics codes (CFD codes) and a detailed subchannel calculation of the core of WWER reactors.

Key words: core, fuel assembly, spacing and combined spacing grids, coolant hydrodynamics, coolant cross flow between fuel assemblies interaction.