

УДК 621.039

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ПОТОКА  
ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА ВВЭР С ТВСА**ДМИТРИЕВ С.М., ДЕМКИНА Т.Д., ДОРОНКОВ Д.В., ДОРОНКОВА Д.С., ПРОНИН А.Н.,  
РЯЗАНОВ А.В., СОЛНЦЕВ Д.Н., ХРОБОСТОВ А.Е.*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
(Нижний Новгород, Российская Федерация)*

**Аннотация.** Представлены результаты экспериментальных исследований 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, расположены как в самих тепловыделяющих сборках, так и межкассетном пространстве. Измерения проводились пятиканальным пневмометрическим зондом. 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.

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

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE COOLANT FLOW IN THE VVER  
REACTOR CORE WITH TVSA FUEL ASSEMBLIES**DMITRIEV S.M., DEMKINA T.D., DORONKOV D.V., DORONKOVA D.S., PRONIN A.N.,  
RYAZANOV A.V., SOLNTSEV D.N., KHROBOSTOV A.E.*Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Ye. Alekseyev  
(Nizhny Novgorod, Russian Federation)*

**Abstract.** The paper presents the results of an experimental study to investigate the coolant interaction 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 airflow velocities in representative areas within the FAs and in the interassembly space. The measurements were performed using a five-channel pressure-tube probe. 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.

**Keywords:** reactor core, fuel assembly, spacer grids, mixing grids, interassembly interaction, coolant fluid dynamics.

**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».

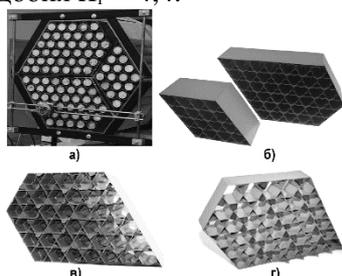
По сравнению с тепловыделяющими сборками ТВСА-Т, основным отличием усовершенствованной ТВСА является применение отдельно стоящих перемешивающих решеток (ПР), которые обеспечивают более интенсивное перемешивание теплоносителя в поперечном сечении сборки, что позволило улучшить эксплуатационные характеристики новой тепловыделяющей сборки [2-7].

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.

### Исследовательский стенд и методика проведения эксперимента

Моделирование течения теплоносителя в активной зоне производилось на аэродинамическом исследовательском стенде [8].

Для проведения исследований были изготовлены экспериментальные модели (ЭМ), геометрически соответствующие конструкциям 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 усовершенствованной ТВСА и ТВСА-Т; *в* – пояс КДР ТВСА-Т; *г* – пояс ПР усовершенствованной ТВСА

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

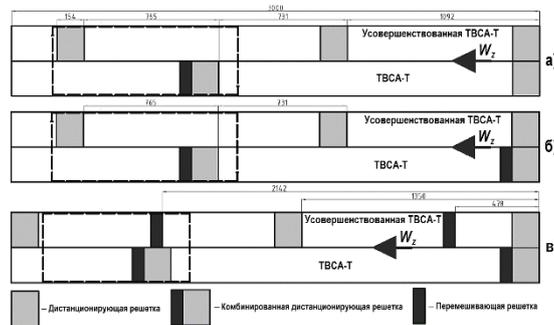
Дистанционирующая решетка (ДР), представленная на рис. 1б, состоит из пружинистых элементов, расположенных согласно треугольной упаковке, и объединённых стальным ободом. Комбинированная дистанционирующая решетка (КДР) ТВСА-Т, представленная на рис. 1в, снабжена турбулизаторами потока, размещёнными по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

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 [9]. 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, имеющие допусаемый предел основной погрешности  $\pm 0,25\%$ .

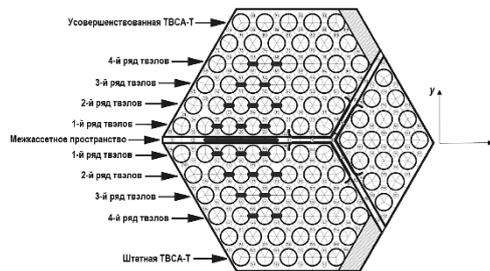
В поперечном сечении смешанной активной зоны была выделена показательная область, состоящая из одной штатной ТВСА-Т и двух усовершенствованных ТВСА. В продольном сечении твэльный пучок активной зоны был разделен на три характерных высотных фрагмента, обозначенных как «нижний», «средний» и «верхний» согласно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

«Нижний» фрагмент твэльного пучка начинается от первых идентично расположенных ДР тепловыделяющихборок обоих типов (рис. 2а). «Средний» фрагмент твэльного пучка начинается от первых идентично расположенных КДР и ДР штатной ТВСА-Т и усовершенствованной ТВСА (рис. 2б). «Верхний» фрагмент начинается от первой отдельно установленной ПР в усовершенствованной ТВСА (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 (рис. 2а). Особенностью ЭМ «среднего» фрагмента твэльного пучка является несимметричность входных условий движения потока, то есть на входе в ЭМ установлены дистанционирующая и комбинированная дистанционирующая решетки соответствующих топливных сборок (рис. 2б). Для ЭМ «верхнего» фрагмента твэльного пучка, помимо установленных на входе дистанционирующей и комбинированной дистанционирующей решетки, характерно наличие отдельно стоящих перемешивающих решеток (рис. 2в).



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



**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, представленном на рис. 3. Данные характерные области расположены в зазоре между соседними ТВСА и зазорах между твэлами каждой из тепловыделяющих сборок (рис. 3).

2. Далее 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 на 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 (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, при котором проводились

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

### Результаты исследований межкассетного перемешивания теплоносителя

Анализ результатов экспериментальных исследований позволил выявить общие закономерности течения потока и заключить следующее:

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

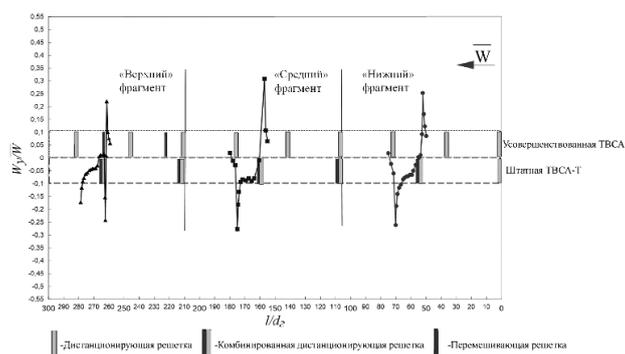


Рис. 4. Распределение поперечной скорости в межкассетном пространстве ( $W_{cp} = 27.5$  м/с,  $Re = 78000$ )

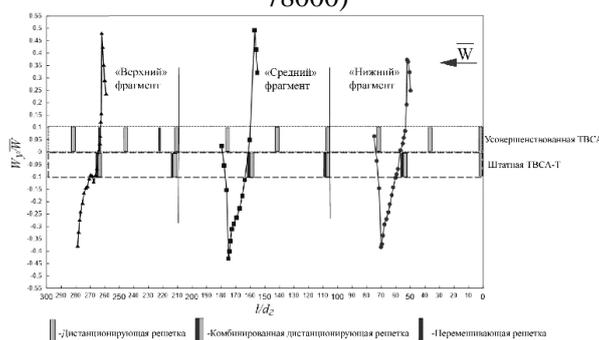


Рис. 5. Распределение поперечной скорости в первых рядах твэлов ТВСА ( $W_{cp} = 27.5$  м/с,  $Re = 78000$ )

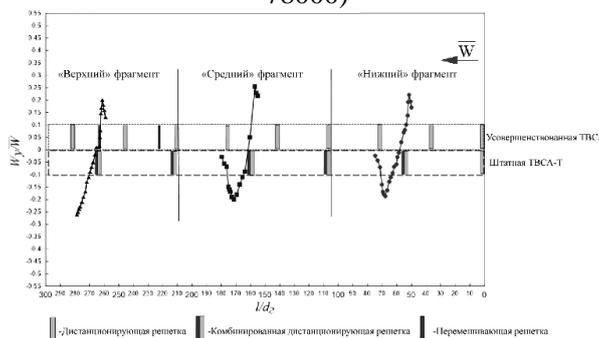


Рис. 6. Распределение поперечной скорости во вторых рядах твэлов ТВСА ( $W_{cp} = 27.5$  м/с,  $Re = 78000$ )

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 (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  $(W_y/W_{cp}) = 0,4$  (рис. 5);

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  $(W_y/W_{cp}) = 0,45$  (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  $(W_y/W_{cp}) = 0,4$  (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 (рис. 5). В «верхнем» фрагменте твэльного пучка величина поперечной скорости  $(W_y/W_{cp})$  близка к значениям скорости на «среднем» фрагменте (рис. 5).

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 (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 распространения 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  $(W_z/W_{cp}) \approx 1,45$ .

7. 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.

8. 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 свою очередь, 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.

#### Список литературы

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. – С. 415.
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 высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2006. – Вып. 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 высших учебных заведений. Ядерная энергетика. - 2012. – Вып. 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 // Вопросы атомной науки и техники. 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 // Вопросы атомной науки и техники. 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., 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.