

УДК 621.039

**П.В. Арсенов, А.В. Варенцов, Д.В. Доронков, Е.Н. Полозкова,  
А.Н. Пронин, А.Е. Хробостов**

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТВСА РЕАКТОРА ВБЭР**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты экспериментальных исследований локальной гидродинамики теплоносителя за перемешивающей решеткой в ТВСА реактора ВБЭР. Исследования проводились моделированием течения потока в ТВСА на аэродинамическом стенде методом диффузии трассера при помощи пневмометрических зондов. Целью работы являлось определение влияния перемешивающей решетки на гидродинамические характеристики потока в области стандартных ячеек и в районе направляющего канала. По результатам проведенных исследований было получено распределение локальных полей скорости за дефлекторами перемешивающей решетки, распределение расходов теплоносителя и концентрации трассера по ячейкам экспериментальной модели. Полученные данные позволили определить закономерности и выявить особенности течения теплоносителя за перемешивающей решеткой ТВСА.

*Ключевые слова:* тепловыделяющая сборка, дистанционирующая и перемешивающие решетки, направляющий канал, гидродинамика, тепломассоперенос.

### **Введение**

В АО «ОКБМ Африкантов» разработан проект атомной станции средней мощности с реактором типа ВБЭР. В качестве прототипа реактора принята судовая реакторная установка, зарекомендовавшая себя длительной безаварийной эксплуатацией на российских судах и кораблях. Внедрение таких станций в энергосистему позволит не только обеспечить тепловой и электрической энергией регионы, не имеющих централизованного энергоснабжения, но и заменить со временем устаревшие энергоблоки, работающие на органическом топливе.

В качестве топлива в активной зоне реактора предполагается использовать бесчехловые ТВСА каркасной конструкции с интенсификаторами теплообмена – перемешивающими решетками типа «порядная прогонка». Силовой каркас ТВС, обеспечивающий жесткость и прочность конструкции, составлен из дистанционирующих решеток, приваренных к уголкам жесткости. Частью силового каркаса являются также направляющие каналы, которые, помимо размещения в них органов системы управления и защиты, воспринимают нагрузки при транспортно-технологических операциях [1]. Применение перемешивающих решеток в ТВС позволяет дополнительно турбулизовать поток в пределах отдельных ячеек и тем самым повысить запас до кризиса теплоотдачи.

Для обоснования теплотехнической надежности активных зон ядерных реакторов ВБЭР с ТВСА необходимо определить влияние перемешивающей решетки на поток теплоносителя. Ввиду особенностей конструкции решетки в поперечном сечении кассеты можно выделить области двух типов: область стандартных ячеек и область направляющих каналов. Различие между ними заключается в том, что ячейки около направляющих каналов имеют меньшее проходное сечение и в этих ячейках отсутствуют турбулизирующие дефлектора перемешивающей решетки.

В НГТУ им. Р.Е. Алексеева был проведен комплекс исследований, направленных на изучение особенностей течения теплоносителя за перемешивающей решеткой в характерных областях ТВСА реактора ВБЭР.

### **Экспериментальный стенд**

Исследования локальных гидродинамических и массообменных характеристик теплоносителя проводились на аэродинамическом стенде на масштабных моделях фрагментов ТВСА. Экспериментальный стенд представляет собой разомкнутый контур. Циркуляция воз-

духа в экспериментальной установке осуществляется за счет работы вентилятора высокого давления. Для обеспечения постоянного давления на входе в экспериментальную модель и сглаживания пульсаций расхода воздуха, возникающих при работе вентилятора, в состав стенда включена ресиверная емкость. Поток воздуха из ресиверной емкости, пройдя участок стабилизации, попадает в экспериментальную модель, после которой выбрасывается в атмосферу. Для проведения исследований было изготовлено две модели, выполненные в полном геометрическом подобии с натурной ТВСА. Первая модель представляет собой фрагмент ТВСА, который включает в себя пояса дистанционирующих решеток, пояс перемешивающей решетки типа «порядная прогонка» и имитаторы твэлов. Вторая модель включает в себя, помимо поясов дистанционирующих решеток, пояса перемешивающей решетки и имитаторов твэлов один имитатор направляющего канала (рис. 1).

Перемешивающая решетка типа «порядная прогонка» представляет собой набор пластин, на верхних кромках с которой расположены турбулизирующие дефлектора. Конструкция данной решетки позволяет организовать поперечные конвективные течения теплоносителя по рядам ячеек ТВС, причем в соседних рядах эти направления противоположны.

Исследования локальных гидродинамических характеристик потока заключались в измерении модуля вектора скорости в каждой ячейке и углов набегания потока. Исследование межъячеечного массообмена потока осуществлялось методом диффузии примесей. Данный метод основан на регистрации поперечного потока массы по некоторой переносимой субстанции. В качестве примеси выбран пропан, поскольку он обладает близкими к воздуху свойствами [2].

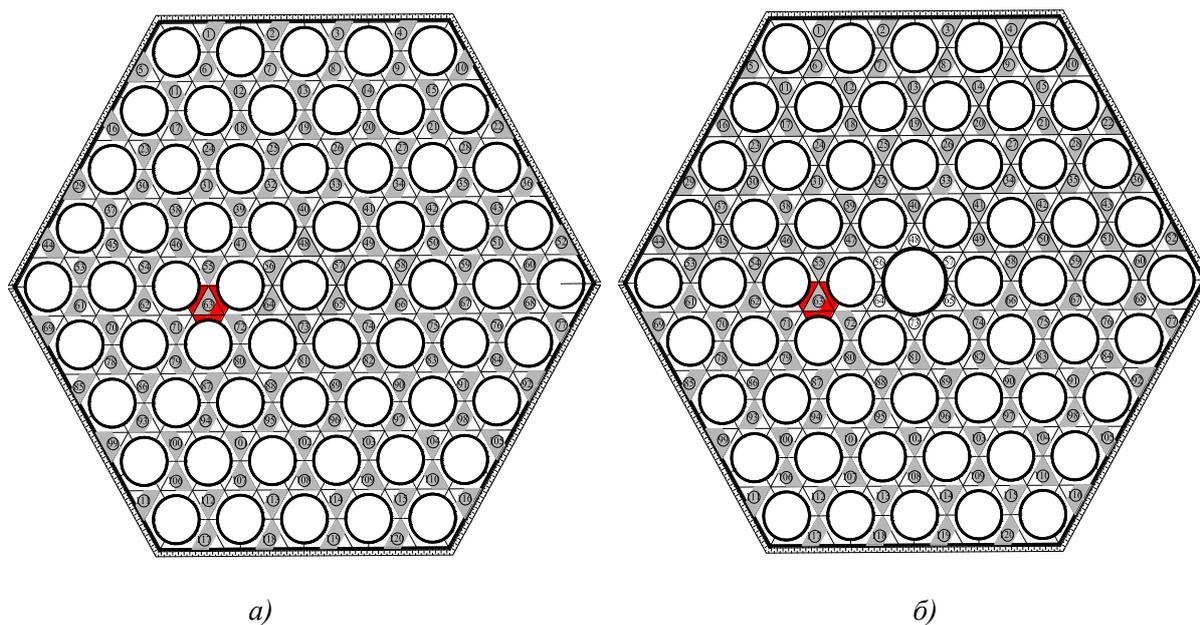


Рис. 1. Экспериментальная модель фрагмента ТВСА:

*a* – без направляющего канала;  
*б* – с направляющим каналом

### Измерительный комплекс

При проведении исследований использовались следующие средства измерения: пятиканальный пневмометрический зонд, трубка Пито–Прандтля, блок аналоговых преобразователей давления, газоанализатор, расходомер газа, ЭВМ с программным обеспечением.

Для измерения направления и вектора скорости потока теплоносителя использовался пятиканальный пневмометрический зонд. Предельные отклонения проекций абсолютной скорости на оси  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  не превышали 7% [3].

Для снятия показаний с каналов пневмометрического зонда использовались аналого-

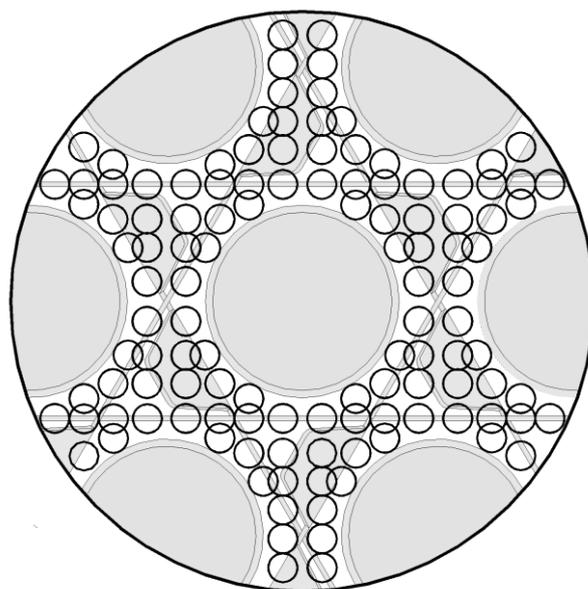
вые преобразователи давления, собранные в единый блок. Погрешность данных преобразователей давления составляет  $\pm 0,25\%$  [4].

Концентрация пропана в газо-воздушной смеси определялась при помощи газоанализатора. Данный газоанализатор позволяет измерять концентрацию углеводородов до 10000 ppm, при этом, если концентрация газа находится в диапазоне 0–1000 ppm, то погрешность измерения составляет  $\pm 15$  ppm, при значении концентрации 1000–10000 ppm погрешность составляет  $\pm 1,5\%$  [5].

Для обеспечения постоянного расхода трассера через модель использовался расходомер газа. Данный расходомер позволяет устанавливать расход трассера через модель с точностью 0,5%.

### Методика исследований

Исследования локальных гидродинамических характеристик заключались в измерении локальных полей скорости потока за перемешивающей решеткой и определении расходов теплоносителя по ячейкам экспериментальной модели. Поле скорости измерялось пятиканальным пневмометрическим зондом в стандартных ячейках, область измерения включала в себя два соседних ряда ячеек (рис. 2). Ориентация турбулизирующих дефлекторов в ячейках измерения такова, что под их воздействием в соседних рядах твэлов образуются конвективные поперечные течения, которые направлены в противоположные стороны. Для определения длины затухания возмущений потока теплоносителя за перемешивающей решеткой измерения проводились в нескольких сечениях на различном расстоянии от решетки.



**Рис. 2. Точки измерения при исследовании поля скорости за перемешивающей решеткой в области стандартных ячеек**

При исследовании процессов межъячеечного массопереноса потока трассер подавался в ячейку инъекции до перемешивающей решетки. Ячейка инъекции трассера была выбрана таким образом, чтобы при проведении исследований была обеспечена возможность изучения межъячеечного перемешивания теплоносителя как в области стандартных ячеек, так и в районе направляющего канала. Количество подаваемого пропана выбрано таким образом, чтобы скорость трассера при выходе из впускного зонда была равна скорости потока.

Таким образом, введение трассера в экспериментальную модель не приводит к изменению профиля скорости в ячейке инъекции. Отбор газовой смеси из потока производился при помощи отборного зонда, по которому он направлялся в газоанализатор для определения значения концентрации пропана. В пределах одной ячейки концентрация изме-

рялась в четырех точках (в центре и на границе с соседними ячейками), после чего значение усреднялось. Концентрация измерялась по всему поперечному сечению экспериментальной модели в двадцати сечениях на различных расстояниях от решетки. По полученным данным была получена подробная картина течения теплоносителя в области стандартных ячеек и в районе направляющего канала.

### Представительность экспериментальных исследований

Для обеспечения возможности применения полученных опытных данных при расчетах штатного устройства необходимо подтверждение представительности экспериментальных исследований. Согласно теории гидродинамического подобия профиль относительной скорости  $w_{\text{лок}}/w_{\text{ср.расх}}$  ( $w_{\text{лок}}$  – локальная скорость потока в заданной точке,  $w_{\text{ср.расх}}$  – средняя скорость потока через экспериментальную модель) в зоне автомодельного течения остается практически неизменным [5].

Следовательно, при моделировании воздухом течения теплоносителя в активной зоне реактора, исследования необходимо проводить в области автомодельного течения. Это позволит получить экспериментальные данные, которые можно будет перенести на натурные условия течения теплоносителя.

Был проведен ряд исследований, направленных на изучение режимов течения потока в экспериментальной модели. Основная цель этих исследований – поиск нижней границы зоны автомодельности. Было установлено, что область автомодельного течения теплоносителя в экспериментальной модели начинается при достижении числа  $Re=55000$  (рис. 3). Все исследования проводились на участке стабилизированного течения при числе  $Re=101000$  и, следовательно, полученные данные могут быть перенесены на натурные условия течения теплоносителя в ТВС.

Также были проведены исследования по определению коэффициентов местного гидравлического сопротивления перемешивающих и дистанционирующих решеток. Установлено, что эти 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.

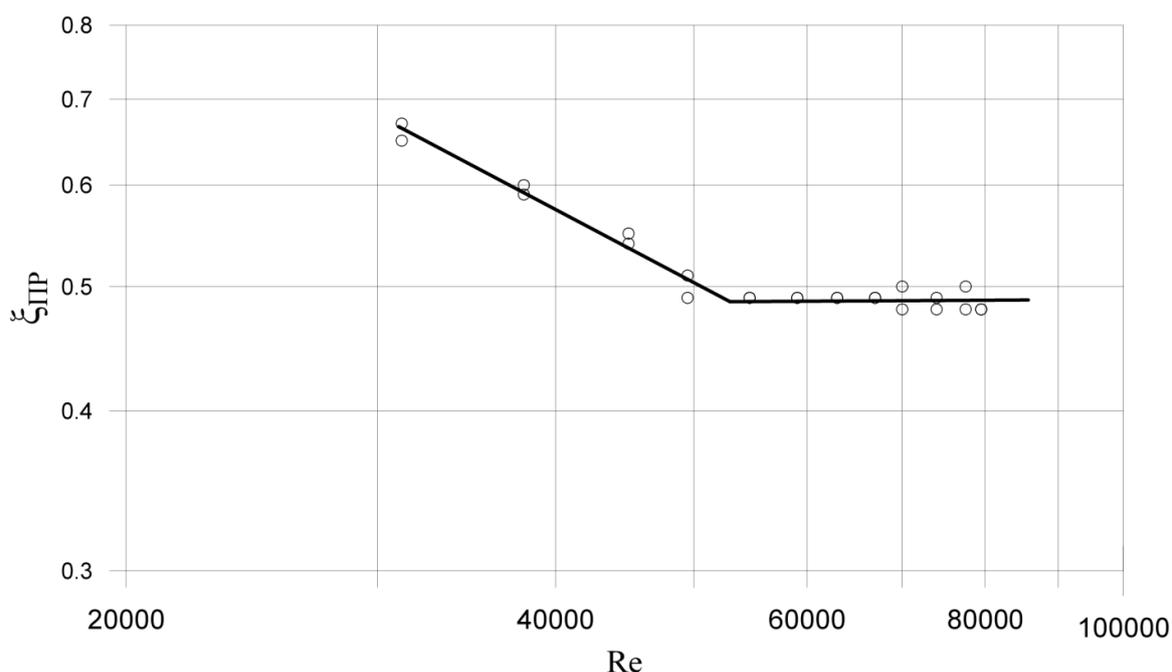


Рис. 3. Зависимость коэффициента местного гидравлического сопротивления перемешивающей решетки типа «порядная прогонка» от числа  $Re$

### Результаты экспериментальных исследований гидродинамических и массообменных характеристик потока за перемешивающей решеткой

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что в области стандартных ячеек за перемешивающей решеткой максимальное значение поперечной скорости наблюдается сразу за решеткой и составляет 40 % от аксиальной. Необходимо отметить, что на расстоянии  $\Delta l/d_1 \approx 3$  ( $\Delta l$  – расстояние до перемешивающей решетки,  $d_1$  – гидравлический диаметр) за перемешивающей решеткой происходит резкое снижение поперечных скоростей, которые уже не превышают 25% от аксиальной. При дальнейшем удалении от решетки затухание поперечных скоростей замедляется (рис. 4). Было выявлено, что в межъячейковом зазоре, где дефлектора направлены в противоположные стороны по отношению друг к другу, наблюдается вихревой характер движения, который имеет протяженность  $\Delta l/d_1 \approx 3$  (рис. 5).

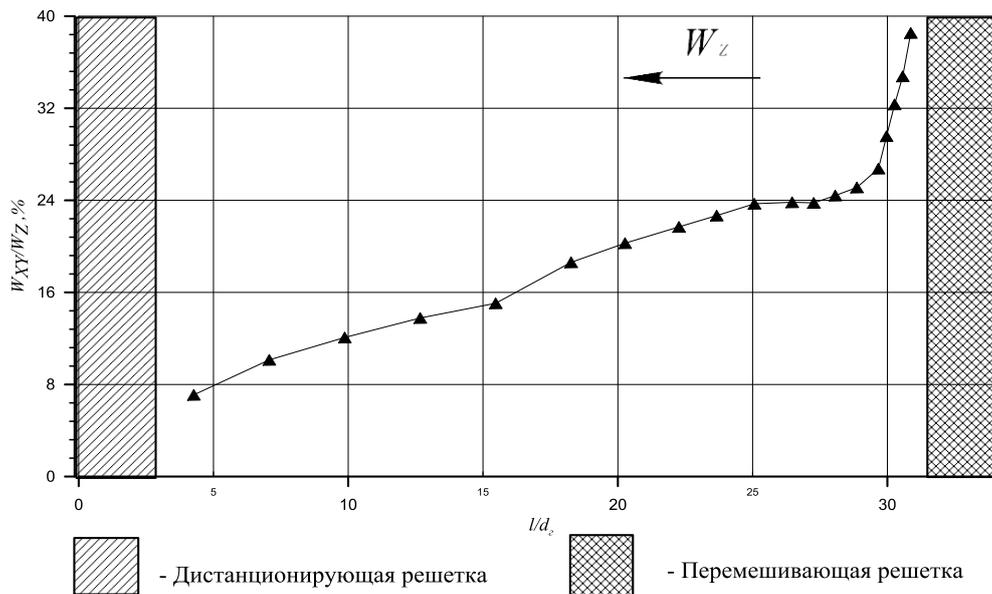


Рис. 4. Распределение поперечной скорости по длине модели за перемешивающей решеткой «порядная прогонка» в области стандартных ячеек ( $Re=101000$ ,  $w_{ср,расх}=37,5$  м/с)

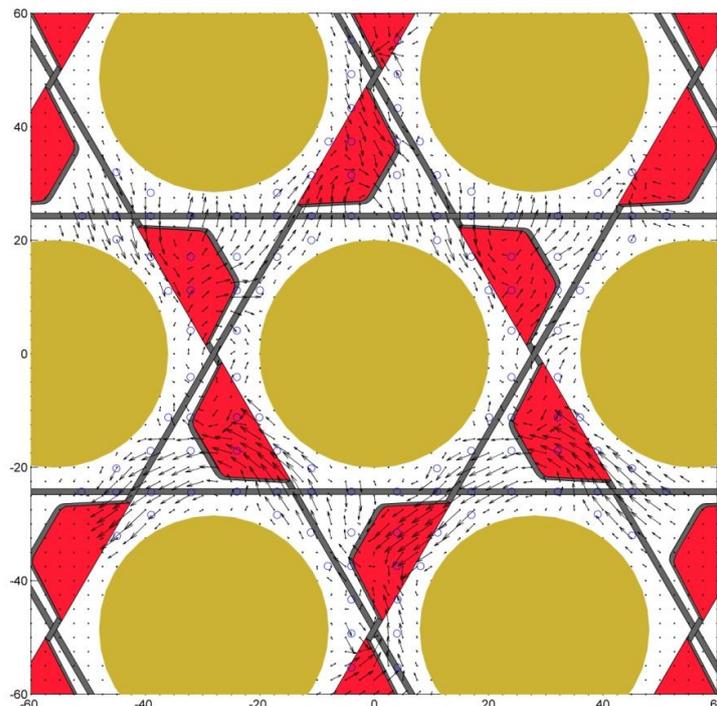


Рис. 5. Векторное поле поперечных составляющих скорости на расстоянии  $\Delta l/d_1=2$  от перемешивающей решетки в области стандартных ячеек ( $Re=101000$ ,  $w_{ср,расх}=37,5$  м/с)

При исследовании процессов межячеечного массопереноса было установлено, что в области стандартных ячеек за перемешивающей решеткой «порядная прогонка» организованы направленные поперечные конвективные течения теплоносителя. Основной расход трассера перемещается из ячейки в ячейку в соответствии с ориентацией турбулизирующих дефлекторов перемешивающей решетки (рис. 6). Перемешивание теплоносителя между соседними рядами ячеек, в которых поток из-за влияния перемешивающей решетки движется в противоположных направлениях, обусловлено естественной турбулентностью потока и является незначительным.

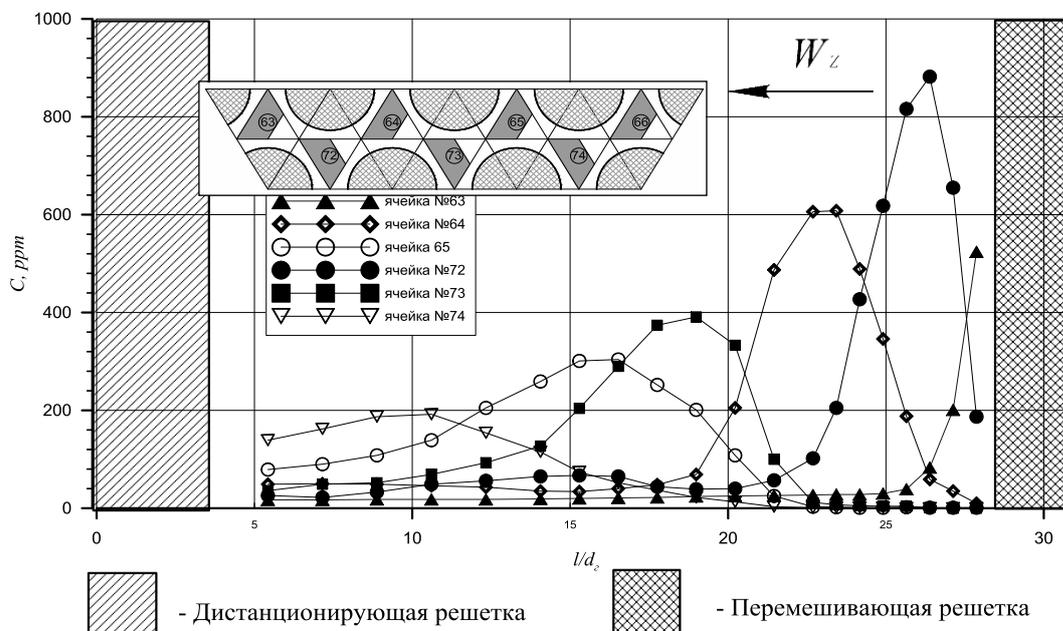


Рис. 6. График распределения концентрации трассера по длине экспериментальной модели за перемешивающей решеткой в модели без направляющих каналов ( $Re=101000$ ,  $w_{ср.расх}=37,5$  м/с)

Анализ распределения трассера в экспериментальных моделях позволил сделать заключение, что интенсивность массообменных процессов в районе направляющего канала ниже, чем в области стандартных ячеек. Глубина распространения трассера из ячейки инъекции при наличии направляющего канала меньше, чем в стандартных ячейках. Так, на расстоянии  $\Delta l/d_r=25$  от перемешивающей решетки в модели без направляющего канала трассер распространился в 17 ячеек, а в модели с направляющим каналом – в 9 ячеек (рис. 7).

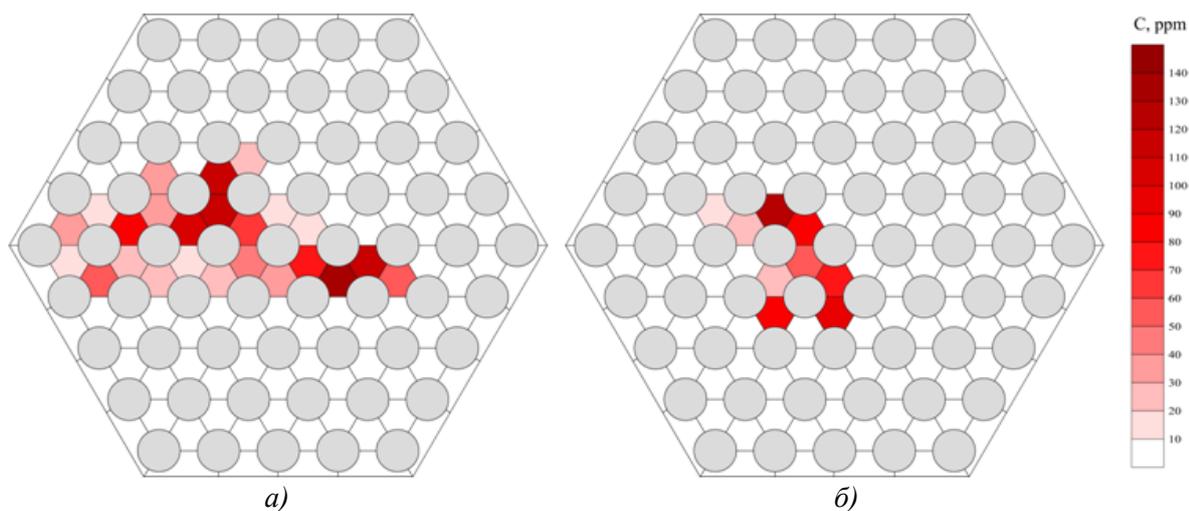
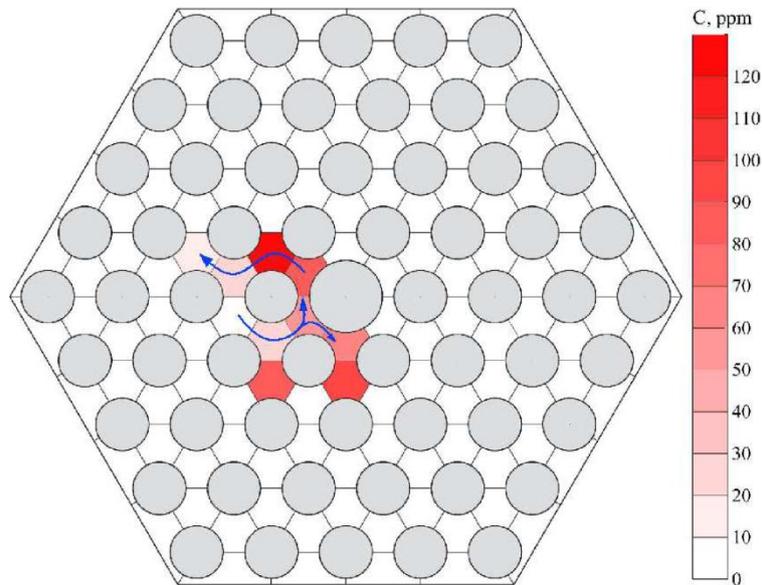


Рис. 7. Распределение трассера на расстоянии  $\Delta l/d_r=25$  от перемешивающей решетки ( $Re=101000$ ,  $w_{ср.расх}=37,5$  м/с):  
 а – модель без направляющего канала; б – модель с направляющим каналом

Наличие в конструкции ТВСА направляющих каналов приводит к тому, что направленное поперечное конвективное течение теплоносителя, вызванное воздействием перемешивающей решетки, нарушается. Поток теплоносителя, попавший из стандартных ячеек в область направляющего канала, разделяется на две равные части. Одна часть продолжает движение в исходном направлении. Вторая часть, попав в соседний ряд твэлов, начинает перемещаться в противоположном направлении согласно ориентации турбулизирующих дефлекторов перемешивающей решетки (рис. 8).



**Рис. 8. Направления распространения трассера в области направляющего канала ( $Re=101000$ ,  $w_{ср,расх}=37,5$  м/с)**

Анализ распределения скоростей теплоносителя по ячейкам экспериментальной модели позволил установить, что расход теплоносителя через ячейки, прилегающие к НК, на 25% меньше, чем через ячейки стандартной области.

### Выводы

При анализе результатов экспериментальных исследований течения теплоносителя за перемешивающей решеткой типа «порядная прогонка» для характерных областей ТВСА реактора ВБЭР было установлено, что:

1) непосредственно за перемешивающей решеткой в области стандартных ячеек поперечные скорости составляют 40% от аксиальной, причем на расстоянии  $\Delta l/d_r \approx 5$  от решетки их значения уже не превышают 25%. При дальнейшем удалении от решетки скорость затухания поперечных скоростей снижается;

2) в зазорах между соседними ячейками, в которых дефлекторы направлены в противоположные стороны, происходит образование вихрей, исчезающих на расстоянии  $\Delta l/d_r \approx 3$  от решетки;

3) затеснение ячеек, прилегающих к направляющему каналу, приводит к перераспределению расходов теплоносителя по ячейкам ТВСА. Расход теплоносителя через ячейки около направляющего канала на 25% меньше чем через ячейки стандартной области;

4) перемешивание теплоносителя в области направляющего канала происходит хуже, чем в области стандартных ячеек ввиду отсутствия турбулизирующих дефлекторов перемешивающей решетки;

5) в области направляющего канала происходит «разрушение» направленного конвективного течения теплоносителя, сформированного в стандартных ячейках под действием дефлекторов перемешивающей решетки.

На основании результатов экспериментальных исследований создан банк данных для верификации CFD-кодов и программ детального поэлементного расчета активных зон ядерных реакторов с ТВСА. Полученные данные приняты для практического использования в АО «ОКБМ Африкантов».

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

#### Библиографический список

1. Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах: учебник / С.М. Дмитриев [и др.] – М.: Машиностроение, 2013. – 415 с.
2. **Дмитриев, С.М.** Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР / С.М. Дмитриев [и др.] // Атомная энергия. – 2012. – Т. 113, Вып. 5. – С. 252–256.
3. **Дмитриев, С.М.** Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в ТВС-Квадрат реакторов PWR с перемешивающими решетками / С.М. Дмитриев [и др.] // Теплоэнергетика. – 2014. – №8. – С. 20–27.
4. **Дмитриев, С.М.** Расчетно-экспериментальные исследования гидродинамики и массообмена теплоносителя за дистанционирующей решеткой тепловыделяющей сборки реактора плавучего энергоблока / С.М. Дмитриев [и др.] // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2014. – №4. – С. 60–68
5. **Дмитриев, С.М.** Экспериментальные и расчетные исследования гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в модели ТВС реактора КЛТ–40С / С.М. Дмитриев [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. Казань. – 2013. №3. – С. 114–119.
6. **Гухман, А.А.** Введение в теорию подобия / А.А. Гухман. – 2-е изд. доп. и перераб. – М.: Высшая школа, 1973.

*Дата поступления  
в редакцию 30.09.2015*

**P.V. Arsenov, A.V.Varentsov, D.V. Doronkov, E.N. Polozkova, A.N. Pronin, A.E. Khrobostov**

#### EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF COOLANT FLOW IN FA VBER

The Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

**Purpose:** The main objectives of the research was to investigate the characteristics of local hydrodynamics and of the coolant flow behind MG in FA of VBER reactors and to determine influence of MG on hydrodynamic characteristics of flow in the area of standard cells and in the area of guide channel.

**Design/methodology/approach:** The main method of hydrodynamics in the nuclear reactor FA investigation is an experimental research of a full-size cassette model and active zones of aero- and hydrodynamics stands using the admixture diffusion method by means of pneumometric probe.

**Findings:** Experimental researches of hydrodynamics in the nuclear reactor FA were organized. According to results of investigations local velocity fields distribution behind MG, distribution of coolant flow and tracer concentration in experimental model have been received. The obtained results allowed to reveal the trends and features of coolant flow behind MG FA.

**Research limitations/implications:** The special databank was created on the base of the experiment results. The data are used for verifying CFD-codes to reduce conservatism on esteeming the PWR reactor heat engineering reliability. The results of the research were accepted are now used by Joint Stock Company OKBM Afrikantov.

**Originality/value:** Topically of this article is in local hydrodynamics of the coolant flow in fuel assemblies of VBER reactors to physical laws. Therefore, we can prove heat engineering reliability of the VBER reactor active zone and to reveal the trends and features of coolant flow behind MG FA.

*Key words:* fuel assembly (FA), spacer and mixing grids, guide channel, hydrodynamics, heat mass-transfer.