

УДК 621.039

С.С. Бородин<sup>1</sup>, А.Л. Буров<sup>2</sup>, А. В. Варенцов<sup>1</sup>, А. Д. Ершов<sup>1</sup>, А.Н. Пронин<sup>1</sup>**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТВСА С ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕЙ РЕШЕТКОЙ ТИПА «ПОРЯДНАЯ ПРОГОНКА» РЕАКТОРА ВБЭР-300**Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Белорусский национальный технический университет<sup>2</sup>

Представлены экспериментальные данные по исследованию гидродинамики потока теплоносителя в ТВСА реакторов ВБЭР-300 с перемешивающей решеткой типа «порядная прогонка». Исследования проводились моделированием течения потока в ТВСА на аэродинамическом стенде. Целью работы являлось определение влияния перемешивающей решетки типа «порядная прогонка» на гидродинамические характеристики потока в области направляющего канала. Полученные данные позволили выявить особенности течения теплоносителя в области направляющего канала за перемешивающей решеткой типа «порядная прогонка» в ТВСА реакторов ВБЭР-300.

*Ключевые слова:* атомные станции средней мощности, ядерный реактор, тепловыделяющая сборка, перемешивающая решетка типа «порядная прогонка», гидродинамика, теплообмен.

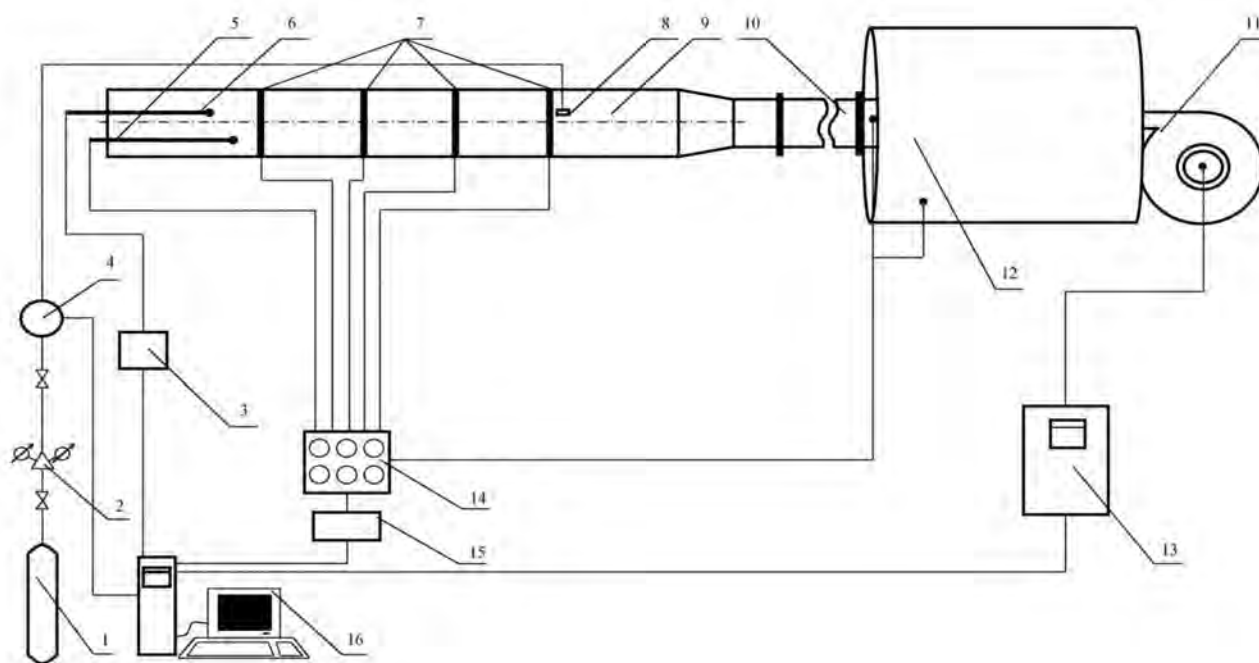
Для обеспечения потребностей в электроэнергии и теплоснабжении коммунально-бытовых и промышленных предприятий в АО «ОКБМ Африкантов» разработан проект реакторной установки средней мощности ВБЭР-300 с реактором блочного типа и развитыми системами пассивной безопасности.

Реакторная установка ВБЭР-300 оптимально сочетает в себе последние достижения в области судовых технологий, включая реакторный блок и герметичный первый контур с традиционными для атомной энергетики (ВБЭР-1000) решениями по активной зоне и топливному циклу. В проекте выполняются все принципиальные требования безопасности, надежности и экономичности, предъявляемые к атомным станциям нового поколения. В данной реакторной установке используются бескожуховые ТВСА каркасной конструкции [1].

Для повышения критического теплового потока в конструкции ТВСА применяются перемешивающие решетки (ПР), выполняющие функцию интенсификаторов теплообмена. Одним из этапов обоснования теплотехнической надежности активной зоны является теплогидравлический расчет, требующий большой информативности, высокой достоверности параметров и значений локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя [2]. Для получения этих данных необходим комплекс экспериментальных исследований по выявлению особенностей течения теплоносителя в активной зоне реактора. 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 них отсутствуют турбулизирующие дефлекторы перемешивающей решетки. Поэтому целесообразно провести изучение локальных гидродинамических характеристик потока в районе направляющего канала ТВСА с ПР типа «порядная прогонка» для выявления особенностей течения теплоносителя и уточнения поядчейковых методик для расчетных теплогидравлических кодов. Данные задачи решаются на базе НГТУ им. П.Е. Алексеева в научно-исследовательской лаборатории «Реакторная гидродинамика» путем моделирования процессов течения потока теплоносителя в пучках труб на аэродинамическом стенде.

### Экспериментальный стенд

Экспериментальный стенд для исследования локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя в области направляющего канала в ТВСА с перемешивающей решеткой типа «порядная прогонка» реактора типа ВБЭР-300 представляет собой аэродинамический разомкнутый контур, через который прокачивается воздух (рис. 1).



**Рис. 1. Схема экспериментального стенда:**

1 - газовый баллон; 2 – редуктор; 3 - базовый блок коммутации/измерения; 4 - модульный газоанализатор; 5 - преобразователи давления САПФИР-22Р; 6 - регулятор расхода газа EL-FLOW; 7 - отборный зонд; 8 - статические отборы; 9 - устройство ввода трассера в ячейку ЭМ; 10 - экспериментальная модель; 11 - успокоительный участок; 12 - буферная емкость; 13 - вентилятор высокого давления; 14 - преобразователь частоты, 15 - ЭВМ

Во время работы стенда воздух посредством вентилятора высокого давления нагнетается в ресиверную емкость, далее проходит успокоительный участок, экспериментальную модель и выбрасывается в атмосферу. Для изучения локальной гидродинамики применяется метод газового трассера. Данный метод основан на регистрации поперечного потока массы по некоторой переносимой субстанции. В качестве примеси выбран пропан, поскольку он обладает наиболее близкими к воздуху свойствами. Так же пропан обладает возможностью быстрой и достаточно точной регистрации, что позволяет получать большие объемы данных в ограниченное время. Трассер подается в характерную ячейку пучка твэлов в начале исследуемого участка, после чего отслеживается его распространение в поперечном сечении и длине экспериментальной модели (ЭМ) и выбрасывается в атмосферу вместе с газозвушной смесью.

Экспериментальная модель представляет собой фрагмент ТВСА реактора ВБЭР-300. Модель выполнена в полном геометрическом подобии и состоит из твэлов-имитаторов, направляющего канала (НК), поясов дистанционирующих решеток (ДР) и пояса перемешивающей решетки типа «порядная прогонка» (рис. 2).

Перемешивающая решетка типа «порядная прогонка» представляет собой набор пластин, на верхних кромках которых расположены турбулизирующие дефлекторы высотой

19,8 мм (что соответствует высоте 4,5 мм натурального дефлектора). Угол отгиба турбулизирующего дефлектора составляет  $30^\circ$ . Конструкция данной решетки позволяет организовать поперечные конвективные течения теплоносителя по рядам ячеек ТВС, причем в соседних рядах эти направления противоположны (рис. 3).

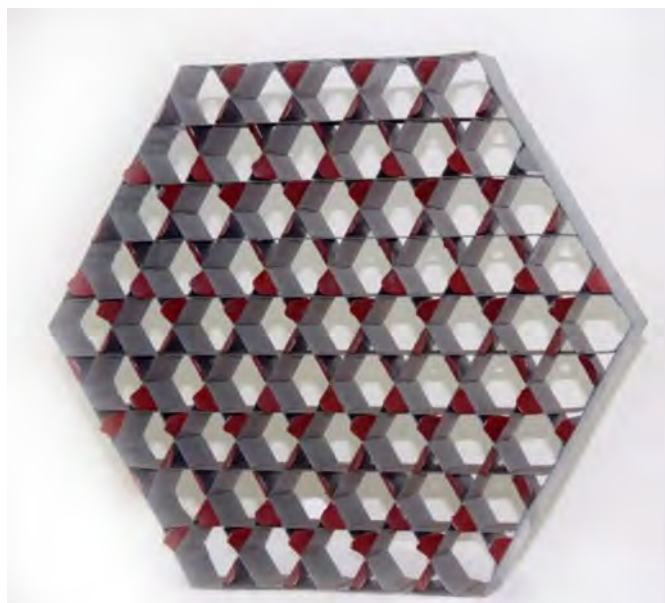


Рис. 2. Пояс перемешивающей решетки типа «порядная прогонка»

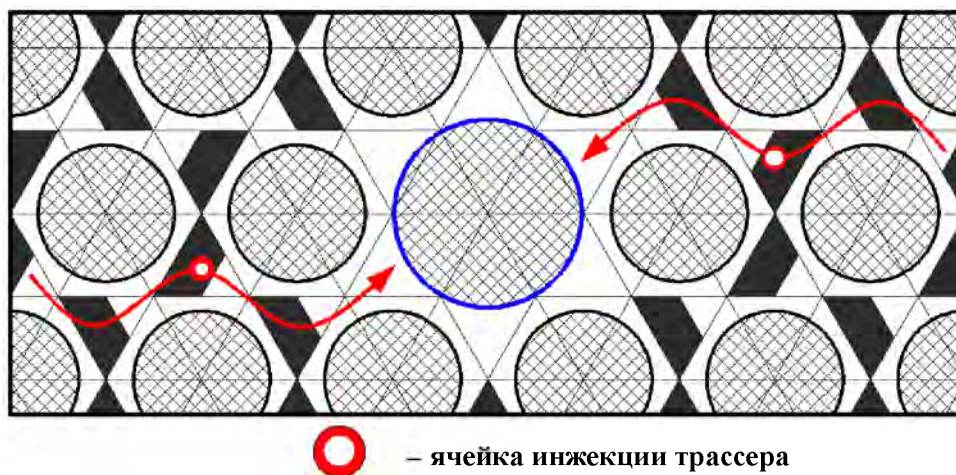


Рис. 3. Схема движения трассера из ячейки подачи по направлению турбулизирующих дефлекторов

### Измерительный комплекс

В состав измерительного комплекса входят: газоанализатор, регулятор расхода газа EL-FLOW, отборный зонд, Г-образные штуцера, ПЭВМ с соответствующим программным обеспечением, блок аналоговых преобразователей давления, базовый блок коммутации/измерения.

Зонд выполнен в виде трубки Пито-Прандля, позволяющей определять значения осевой скорости, статического и полного давлений в исследуемой точке, а также выполняющей функции транспортного газопровода для отбора пробы трассера в газоанализатор [3].

Для измерения концентрации углеводородов  $C_nH_m$  в газозооной смеси использовался газоанализатор, принцип работы которого основан на измерении величины поглоще-

ния инфракрасного излучения в области длины волны 3,4 мкм. Диапазон измеряемых концентраций 0...10000 ppm, погрешность измерения при этом с учетом индивидуальной градуировки равна  $\pm 5$  ppm (0...1000 ppm);  $\pm 1,5\%$  (1000...10000 ppm).

Для поддержания заданного расхода газа использовался массовый расходомер EL-FLOW, позволяющий измерять и регулировать потоки газов в диапазонах от 0,014..0,7 мл/мин до 8...1670 л/мин при давлениях от вакуума до 400 бар. Погрешность при этом составляет не более 0,5% [4].

### Методика проведения исследований

Методика проведения экспериментальных исследований локальной гидродинамики потока в модели ТВСА реактора ВБЭР-300 заключалась в следующем:

1. Поперечное сечение модели разбивается на ячейки, каждой из которых присваивается свой номер.
2. Газовый трассер с помощью впускного зонда подается последовательно в ячейки в области направляющего канала до перемешивающей решетки – ячейки № 58 и № 63. Ячейки выбраны таким образом, что газоздушная смесь, двигаясь из ячейки подачи по направлению турбулизирующих дефлекторов, перемещается в область направляющего канала (рис. 4).
3. Измерение концентрации трассера производится в одном сечении перед перемешивающей решеткой и в двадцати сечениях за решеткой по длине экспериментальной модели. Сечения, в которых производится замер концентрации трассера, показаны на рис. 5.
4. По полученным данным строятся картограммы и графики распределения относительной концентрации трассера по длине ЭМ.

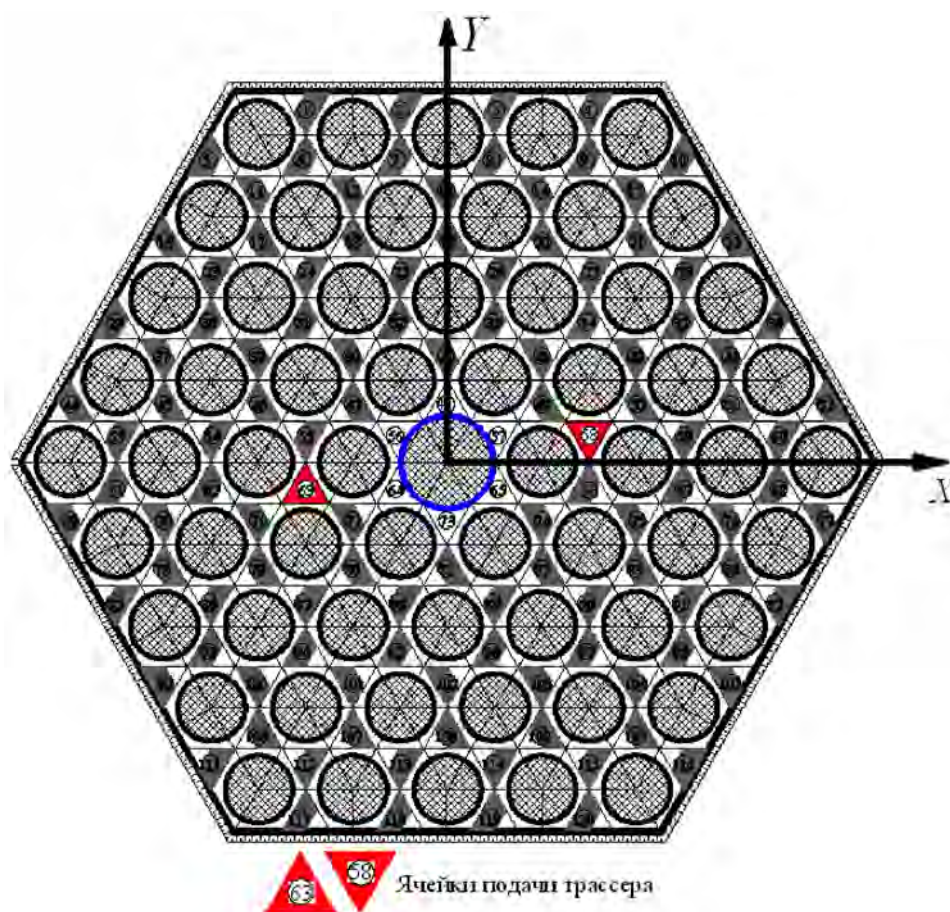


Рис. 4. Поперечное сечение экспериментальной модели

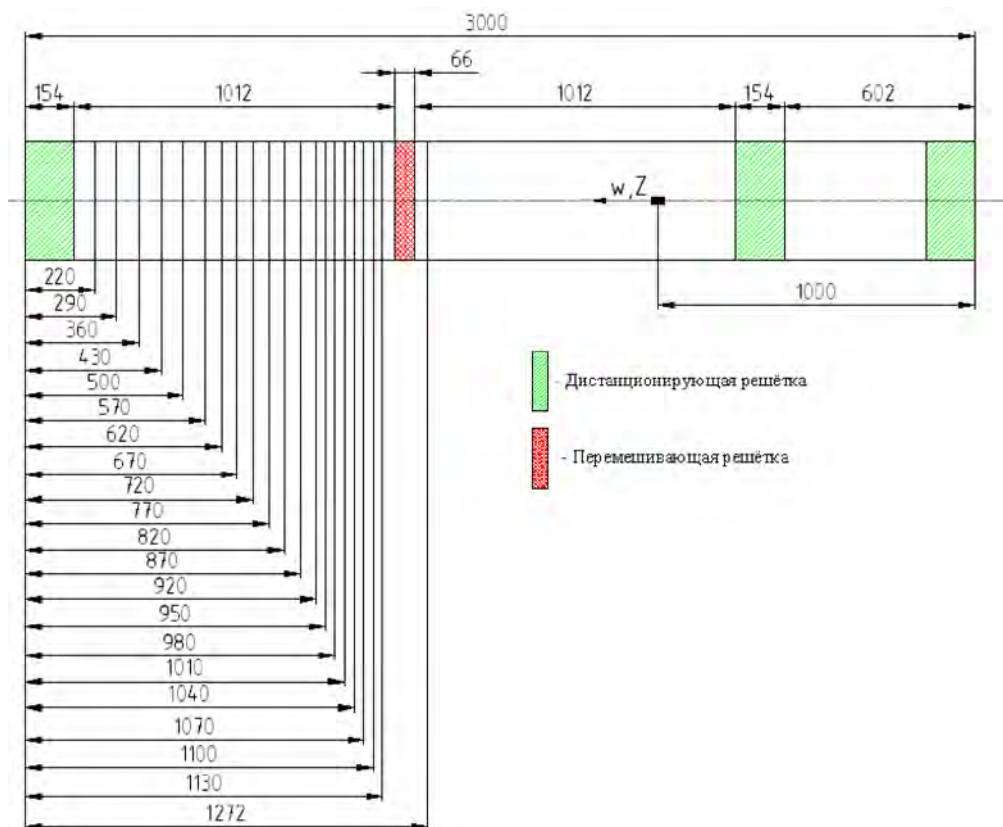


Рис. 5. Сечения измерения концентрации трассера по длине ЭМ

### Представительность исследований

Важный этап проведения экспериментальных исследований – подтверждение их представительности. Поскольку моделирование течения водяного теплоносителя осуществляется воздухом, то на основе теории подобия можно утверждать, что в области автомодельности профиль относительной скорости остается практически неизменным [5]. Следовательно, проведение исследований на ЭМ в зоне автомодельности позволит перенести результаты эксперимента на натурные условия течения теплоносителя в штатных активных зонах. Для этого был проведен ряд испытаний, направленных на определение режимов течения теплоносителя в ЭМ, нахождение границ зон автомодельного течения теплоносителя. По полученным результатам область автомодельного течения в ЭМ начинается при числе Рейнольдса 55000, а все исследования межячейкового взаимодействия теплоносителя проводились при числе Рейнольдса 100970 на участке стабилизированного автомодельного течения теплоносителя. Были определены значения коэффициентов местного гидравлического сопротивления дистанционирующих, перемешивающих и комбинированных дистанционирующих решеток  $\xi = 0,55$ , которые соответствуют значениям сопротивления натуральных ДР, ПР и КДР штатных ТВСА. Была произведена оценка точности полученных опытных результатов исследований.

### Результаты экспериментальных исследований локальной гидродинамики теплоносителя в области направляющего канала ТВСА с перемешивающей решеткой типа «порядная прогонка» для реакторов ВБЭР-300

Для учета влияния распределения концентрации трассера перед ПР на полученные результаты экспериментальные данные целесообразно представить в виде относительных концентраций  $N_i^j$  по длине ЭМ  $N_i^j = C_i^j / C_0$ , где  $N_i^j$  – относительная концентрация трассера в  $i$ -й ячейке  $j$ -го слоя;  $C_i^j$  – концентрация газообразного трассера в  $i$ -й ячейке  $j$ -го слоя пучка,

ppm;  $C_0$  – максимальная концентрация газообразного трассера перед перемешивающей решеткой, ppm.

Анализ результатов экспериментальных исследований особенностей течения потока теплоносителя показал следующее:

1. Из графика на рис. 6 видно, что перемешивающая решетка вносит возмущения в поток теплоносителя, при этом сразу за решеткой значение относительной концентрации трассера на 35% ниже, чем перед ПР.

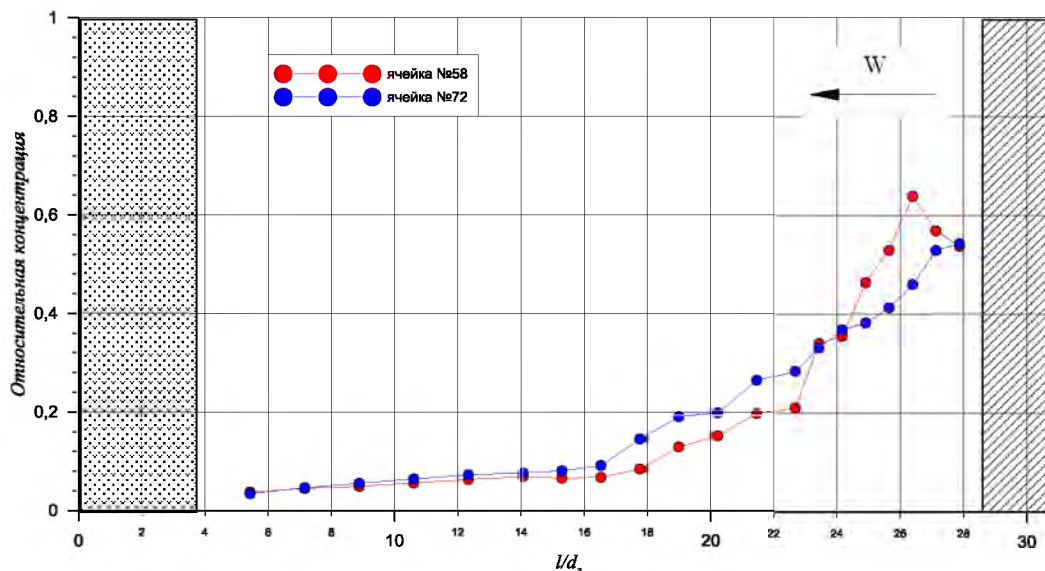


Рис. 6. Распределение концентрации трассера по длине ЭМ в ячейках № 72 и № 58 (при подаче трассера в ячейки № 63 и № 58 соответственно ( $\bar{w}=37,50$  м/с,  $Re=100970$ ))

2. За перемешивающей решеткой типа «порядная прогонка» наблюдается направленное, постепенно затухающее движение трассера, обусловленное соответственным расположением дефлекторов. Затухание массообменных процессов, вызванных воздействием перемешивающей решетки на поток теплоносителя, происходит на расстоянии  $\Delta l/d \approx 14-16$  (рис. 7).

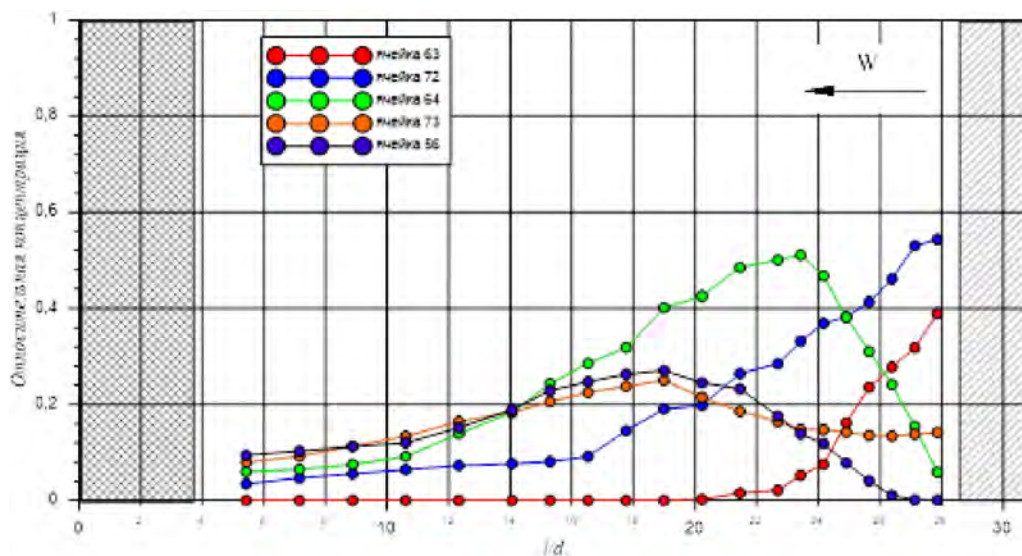


Рис. 7. Распределение концентрации трассера по длине ЭМ при подаче трассера в ячейку № 63 ( $\bar{w}=37,50$  м/с,  $Re=100970$ )

3. Переток трассера между соседними рядами ячеек, в которых организована «прогонка» теплоносителя в противоположных направлениях, незначителен (рис. 8). Это свиде-

тельствует о низкой интенсивности процессов массообмена между ячейками данного типа ввиду разнонаправленной ориентации турбулизирующих дефлекторов перемешивающей решетки в них.

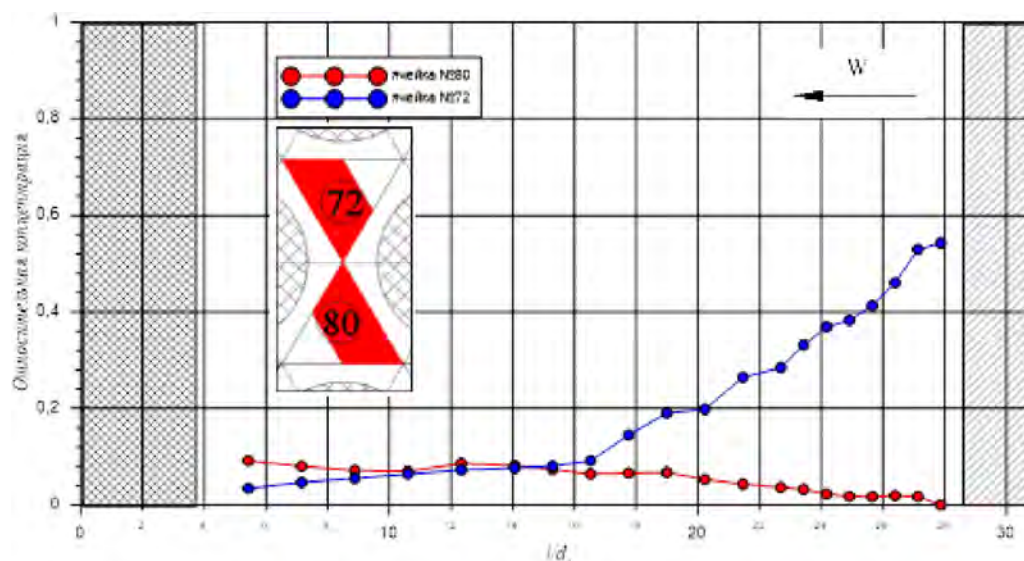


Рис. 8. Распределение концентрации трассера по длине ЭМ в ячейках № 72 и № 80 при подаче трассера в ячейку № 63 ( $\bar{w}=37,50$  м/с,  $Re=100970$ )

4. Трассер, поступивший из стандартных ячеек в ячейки № 64 и № 57 (при подаче трассера в ячейки № 63 и № 58 соответственно), начинает равномерно распределяться по ячейкам № 56 и № 73 в первом случае и ячейкам № 48 и № 65 во втором (рис. 9), а снижение концентрации в этих ячейках по длине экспериментальной модели происходит медленнее, чем в стандартных ячейках. Это свидетельствует о нарушении конвективных течений, сформированных в стандартных ячейках, и изменении механизма переноса трассера в области направляющего канала. Данное явление обусловлено отсутствием турбулизирующих дефлекторов в ячейках, прилегающих к НК.

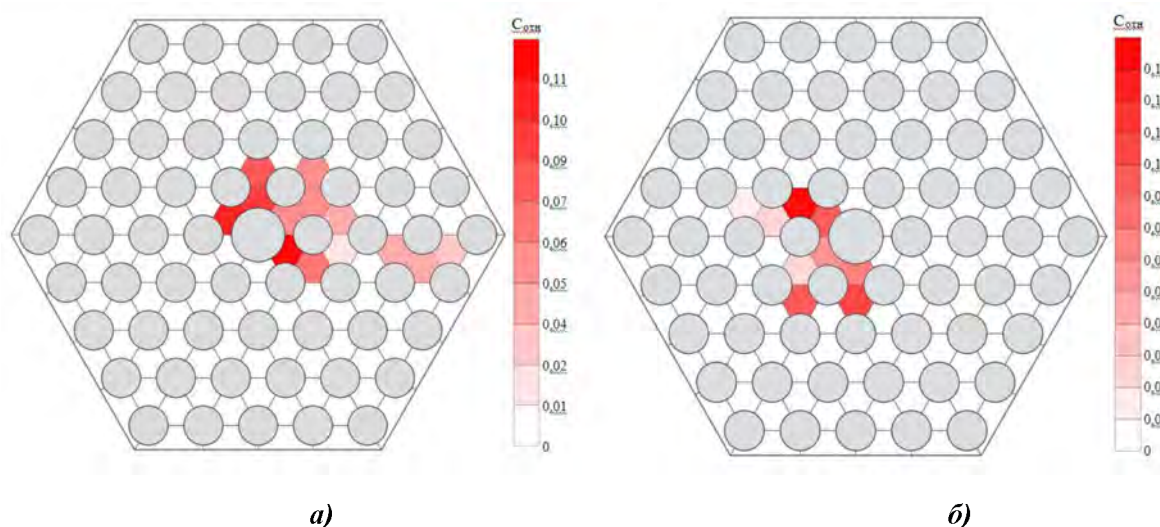


Рис. 9. Картограммы распределения трассера в в выходном сечении ЭМ

( $l/d_2=5,43$ ,  $\bar{w}=37,50$  м/с,  $Re=100970$ ):

а — ячейка подачи трассера № 58;

б — ячейка подачи трассера № 63

5. Затеснение ячеек, прилегающих к НК, приводит к перераспределению расходов теплоносителя по ячейкам: расход теплоносителя в этих ячейках составляет  $\sim 70\%$  от расхода в стандартных ячейках (рис. 10).

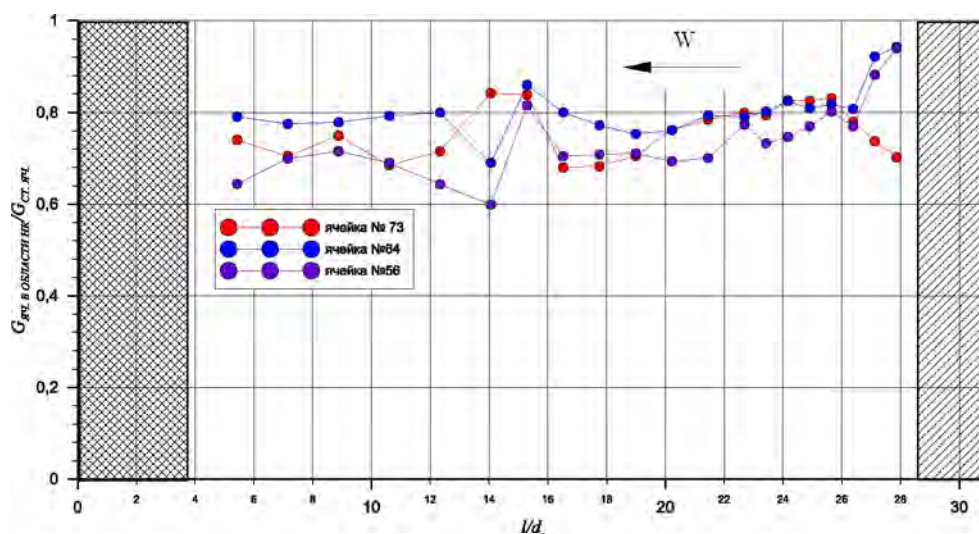


Рис. 10. Отношение распределения расходов теплоносителя через ячейки в области НК к расходу теплоносителя через стандартную ячейку ( $\bar{w} = 37,50$  м/с,  $Re = 100970$ )

### Выводы

При анализе результатов экспериментальных исследований течения теплоносителя за перемешивающей решеткой типа «порядная прогонка» в области направляющего канала ТВСА реактора ВБЭР было установлено:

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

2. При прохождении газозовоздушной смеси через перемешивающую решетку происходит резкое снижение максимальной концентрации трассера на 35-40% из-за резкого увеличения интенсивности перемешивания теплоносителя, что объясняется перераспределением трассера в поперечном сечении фрагмента модели ТВСА вследствие влияния ПР.

3. Между соседними рядами ячеек с противоположными направлениями прогонки теплоносителя практически отсутствуют перетоки трассера, что указывает на низкую интенсивность процессов массообмена между такими ячейками из-за разнонаправленной ориентации дефлекторов.

4. Затухание массообменных процессов, вызванных воздействием перемешивающей решетки на поток теплоносителя, происходит на расстоянии  $\Delta l/d \approx 14-16$ .

5. Отсутствие турбулизирующих дефлекторов в ячейках, прилегающих к НК, приводит к нарушению конвективных течений, сформированных в стандартных ячейках, и снижению интенсивности массообменных процессов в области направляющего канала.

6. Расход теплоносителя через ячейки, прилегающие к НК, составляет  $\sim 70\%$  от расхода теплоносителя через стандартные ячейки.

На основании результатов экспериментальных исследований создан банк данных для верификации CFD-кодов и программ детального поячеечного 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. (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 / С.М. Дмитриев [и др]. – М.: Машиностроение, 2013.
2. К вопросу о методологии обоснования теплотехнической надежности активных зон водяных энергетических реакторов / С.М. Дмитриев [и др.] // Труды Нижегородского государственного технического университета им. П.Е. Алексеева. – 2014. – №2. – С. 98–108.
3. Применение многоканального пневмометрического зонда для исследования профиля скорости теплоносителя в моделях топливных кассет ядерных реакторов / С.М. Дмитриев [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2015. – Т. 6. – №2. – С. 188–195.
4. Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР / С.М. Дмитриев [и др.] // Атомная энергия. – 2012. – Т. 113. – Вып. 5. – С. 252–257.
5. Экспериментальные исследования локальной гидродинамики потока теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР с ТВСА-12PLUS / С.М. Дмитриев [и др.] // Вестник МЭИ. – 2016. – №2. – С. 15–21.

*Дата поступления  
в редакцию 22.06.2016*

**S.S. Borodin<sup>1</sup>, A.L. Burov<sup>2</sup>, A.V. Varentsov<sup>1</sup>, A.D. Ershov<sup>2</sup>, A.N. Pronin<sup>2</sup>**

**EXPERIMENTAL STUDIES IN THE LOCAL HYDRODYNAMICS COOLANT TVSA WITH STIRRING BARS OF "SWEEPING THROUGH THE RANKS" VBER-300**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeyev<sup>1</sup>,  
Belarusian National Technical University<sup>2</sup>

Experimental data on the study of the coolant flow hydrodynamics in reactors TVSA WBER-300 with stirring bars of the "sweeping through the ranks." The studies were conducted in the course of flow simulation TVSA on an aerodynamic stand. The aim of the work was to determine the effect of mixing grid "sweeping through the ranks" type on the hydrodynamic characteristics of the flow in the area of the guide channel. The findings revealed the features of the flow of coolant in the guide channel for the stirring bars of the "sweeping through the ranks" in TVSA reactors WBER-300.

*Key words:* atomic medium power stations, nuclear reactor fuel assembly, mixing grid type "sweeping through the ranks", fluid dynamics, heat transfer.