

УДК621.039

С.С. Бородин¹, А.В. Варенцов¹, Д.В. Доронков¹, А.Н. Пронин¹, Г.Ш. Иксанова²**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ
И МАССООБМЕНА ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ФРАГМЕНТЕ
АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА ВБЭР–300**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ОАО «ОКБМ Африкантов»²

Представлены результаты и анализ экспериментальных данных по исследованию гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в фрагменте активной зоны реактора ВБЭР-300

Ключевые слова: ядерный реактор, тепловыделяющая сборка, гидродинамика теплоносителя, перемешивающая решетка

Введение

В ОАО «ОКБМ Африкантов» разработан проект установки с водо-водяным реактором блочного типа мощностью 300 МВт. В данной реакторной установке используются бескожуховые ТВСА каркасной конструкции.

Для повышения критического теплового потока в конструкции ТВС применяются перемешивающие решетки (ПР), выполняющие функцию интенсификации теплообмена.

Одним из этапов обоснования теплотехнической надежности активной зоны является теплогидравлический расчет, требующий большой информативности, высокой достоверности параметров и значений локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя. Для получения этих данных необходим комплекс экспериментальных исследований по выявлению закономерностей и особенностей течения теплоносителя в активной зоне реактора.

Данные задачи решаются на базе НГТУ им. Р.Е. Алексеева в научно-исследовательской лаборатории «Реакторной гидродинамики» путем моделирования процессов течения потока теплоносителя в пучках труб на аэродинамическом стенде

Экспериментальный стенд

Экспериментальный стенд для исследований локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя представляет собой аэродинамический разомкнутый контур, через который прокачивается воздух (рис. 1).

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 межъячеечного массообмена в экспериментальной модели применяется метод диффузии примесей [1].

Данный метод основан на регистрации поперечного потока массы по некоторой переносимой субстанции (краски, соли, газа и т.д.). В качестве примеси выбран пропан, поскольку он обладает наиболее близкими к воздуху свойствами, возможностью быстрой и достаточно точной регистрации, что позволяет получать большие объемы данных в ограниченное время. Пропан подается в характерную ячейку пучка твэлов, после чего отслеживается его распространение по сечениям и длине экспериментальной модели (ЭМ).

Экспериментальная модель представляет собой фрагмент активной зоны реактора ВБЭР-300, включающей в себя сегменты трех топливных кассет ТВСА и межкассетное пространство (рис. 2). Модель выполнена в полном геометрическом подобии и состоит из: твэ-

лов-имитаторов, направляющих каналов (НК), уголков жесткости, поясов дистанционирующих решеток (ДР) и перемешивающих решеток.

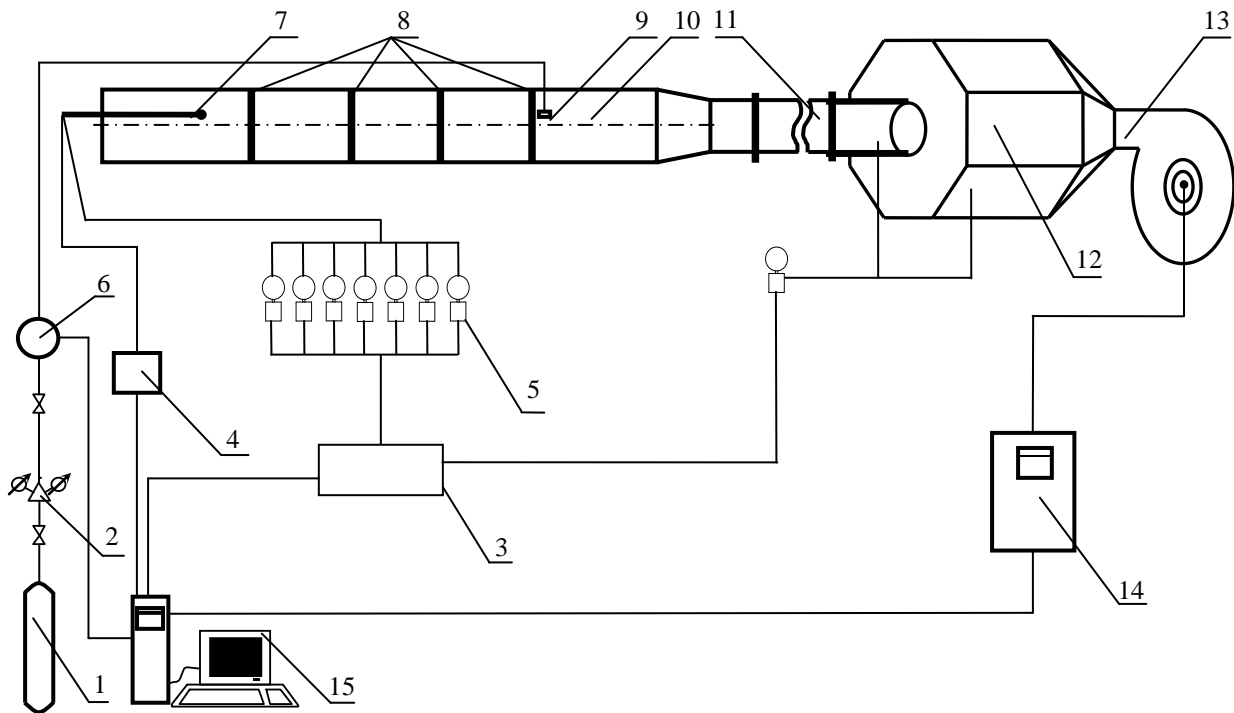


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

1 - газовый баллон; 2 – редуктор; 3 - базовый блок коммутации/измерения Agilent 34980A; 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

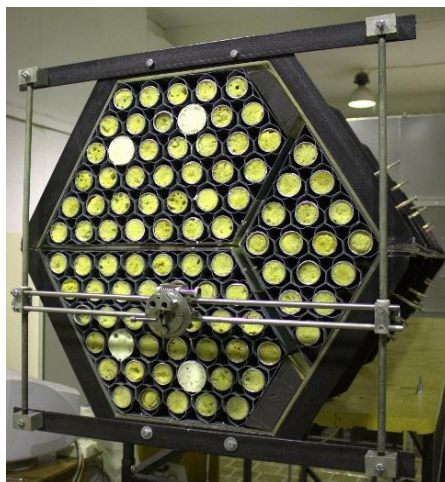


Рис. 2. Экспериментальная модель ТВСА реактора ВВЭР

Перемешивающая решетка типа «порядная прогонка» (рис. 3) имеет турбулизирующие дефлекторы высотой 19,8 мм (что соответствует высоте 4,5 мм натурального дефлектора), угол отгиба турбулизирующего дефлектора составляет 30° [2].

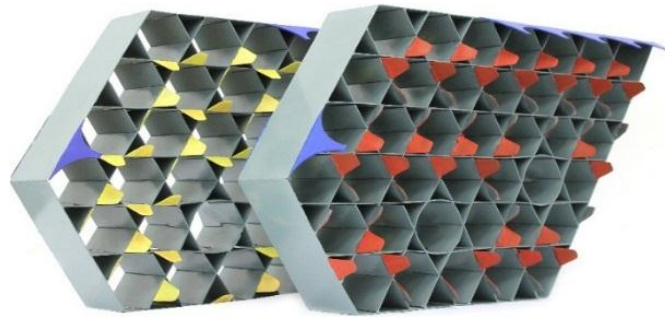


Рис. 3. Пояса перемешивающих решеток

Измерительный комплекс

В состав измерительного комплекса входят газоанализатор, регулятор расхода газа EL-FLOW, отборный зонд, выполненный в виде трубки Пито-Прандтля и одновременно выполняющий функцию транспортного газопровода в газоанализатор, ПЭВМ с соответствующим программным обеспечением.

Для измерения концентрации углеводородов C_nH_m в газо-воздушной смеси использовался газоанализатор, принцип работы которого основан на измерении величины поглощения инфракрасного излучения в области длины волны 3,4 мкм. Диапазон измеряемых концентраций: 0...10000 ppm, погрешность измерения при этом с учетом индивидуальной градуировки равна ± 5 ppm (0...1000 ppm); $\pm 1,5\%$ (1000...10000 ppm). Величина 10000 ppm соответствует одному объемному проценту газа трассера в газо-воздушной смеси [3].

Для поддержания заданного расхода газа использовался массовый расходомер EL-FLOW, который позволяет 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%.

Методика проведения исследований

Методика проведения экспериментальных исследований локального массообмена заключалась в следующем:

1. Для выявления влияния взаимного расположения ДР и ПР на поток теплоносителя рассматривалось два варианта их расположения друг относительно друга:

а) изучение влияния ПР на течение потока теплоносителя (схема 1 рис. 4);

б) изучение влияния ДР на течение потока теплоносителя при её расположении после ПР (схема 2 рис. 4).

Схема №1

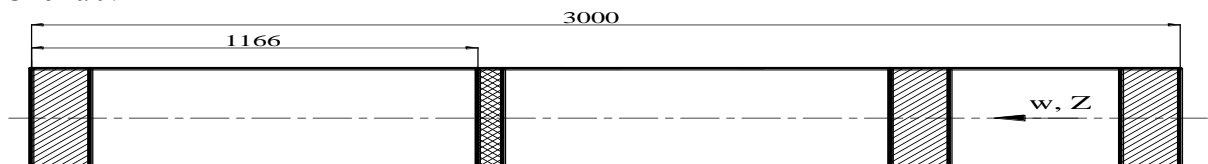


Схема №2

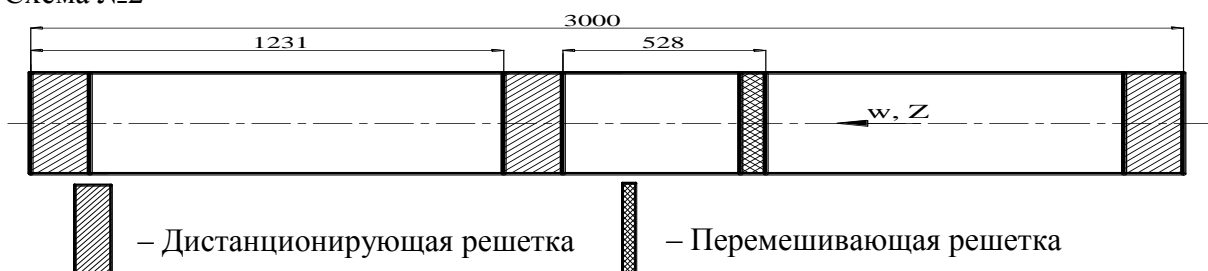


Рис. 4. Схемы расположения ПР и ДР в экспериментальной модели

2. Поперечные сечения экспериментальных моделей были разбиты на ячейки, каждой из которых был присвоен свой индивидуальный порядковый номер (рис. 5).

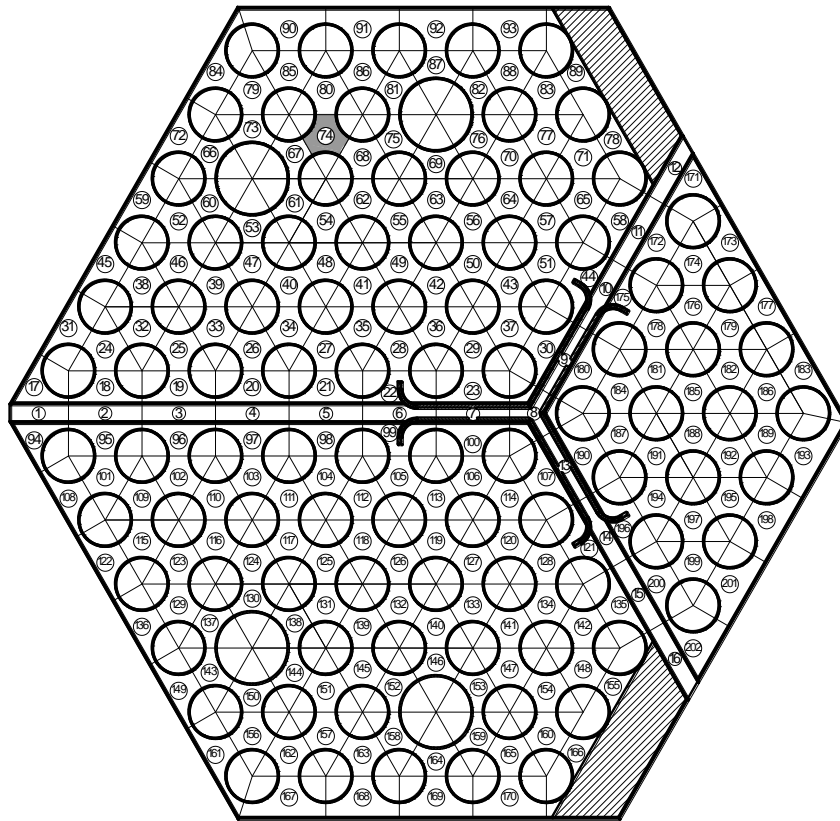


Рис. 5. Расположение зон измерения в поперечном сечении экспериментальной модели

3. Газовый трассер через впускной зонд подавался в характерную ячейку ЭМ до пояса перемешивающей решетки по ходу течения потока теплоносителя. Далее с помощью отборного зонда производился замер концентрации трассера газоанализатором по центрам всех ячеек за исследуемыми поясами решеток в характерных сечениях по длине ЭМ.

4. По полученным данным строились картограммы и графики зависимости распределения концентрации трассера от относительной координаты для характерных зон поперечного сечения ЭМ. Все экспериментальные исследования проводились в диапазоне чисел Re $8 \cdot 10^4 - 10^5$ на участке стабилизированного автомодельного течения теплоносителя, поэтому полученные результаты можно перенести на натурные условия течения теплоносителя в активных зонах со штатными ТВСА.

Для обоснования представительности экспериментальных исследований было подтверждено, что в области автомодельного течения теплоносителя коэффициенты местного гидравлического сопротивления перемешивающих решеток ЭМ соответствуют коэффициентам гидравлического сопротивления натуральных решеток и составляют $\xi_{\text{ПР}} = 0,55$ [4].

Результаты исследований распределения концентрации трассера в модели фрагмента активной зоны реактора ВВЭР при различных схемах постановке перемешивающих решеток

Анализ результатов распределения концентрации трассера в экспериментальной модели при постановке одной ПР позволил сделать следующие выводы:

1. За дефлекторами перемешивающей решетки типа «порядная прогонка» происходит направленное постепенно затухающее движение трассера, обусловленное соответствующим расположением дефлекторов (рис. 6).

2. Часть трассера передается в соседние ячейки за счет турбулентного массообмена, имеющего значительно большую величину за ПР вследствие дополнительной турбулизации потока.

3. Распределение концентрации трассера в ячейках прилежащих к НК осуществляется посредством механизма турбулентной диффузии, поскольку в районе НК отсутствуют перемешивающие дефлектора.

4. Затухание возмущений массообменных характеристик потока теплоносителя за ПР происходит на расстоянии $\Delta l/d=17\div 18$.

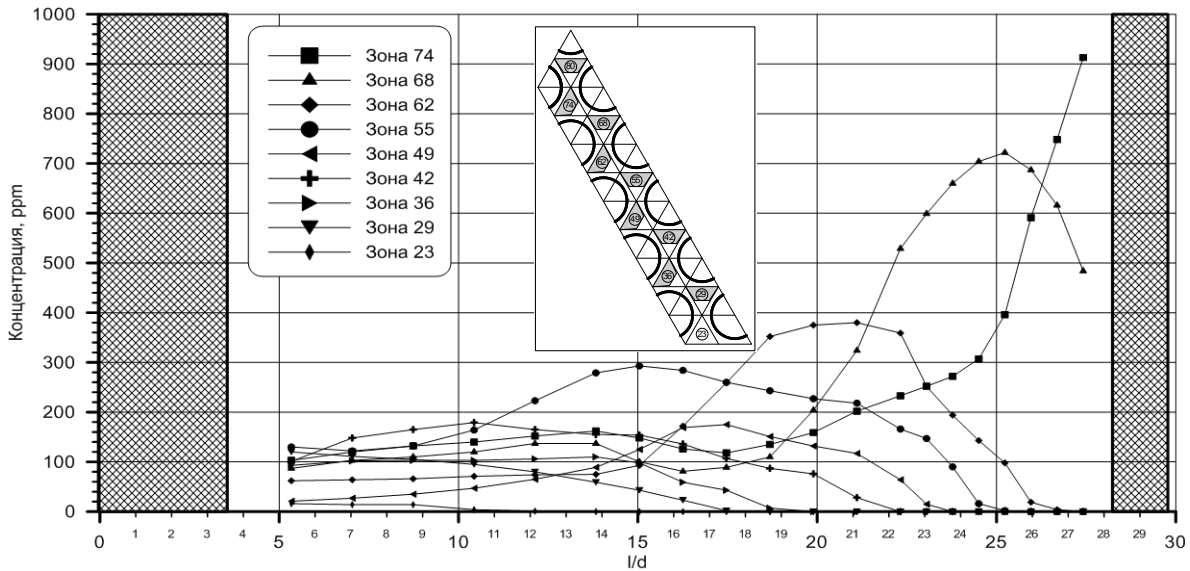


Рис. 6. Распределение концентрации трассера по длине экспериментальной модели за ПР типа «порядная прогонка»

Анализ результатов распределения концентрации пропана в экспериментальной модели при постановке системы ДР после ПР по ходу движения потока теплоносителя показал следующее.

1. Трассер из ячейки подачи за перемешивающей решеткой распространился в 16 ячеек (рис. 7) на расстоянии $\Delta l/d \approx 11$ от решетки. Далее за дистанционирующей решеткой происходит постепенное выравнивание концентрации трассера по поперечному сечению модели.

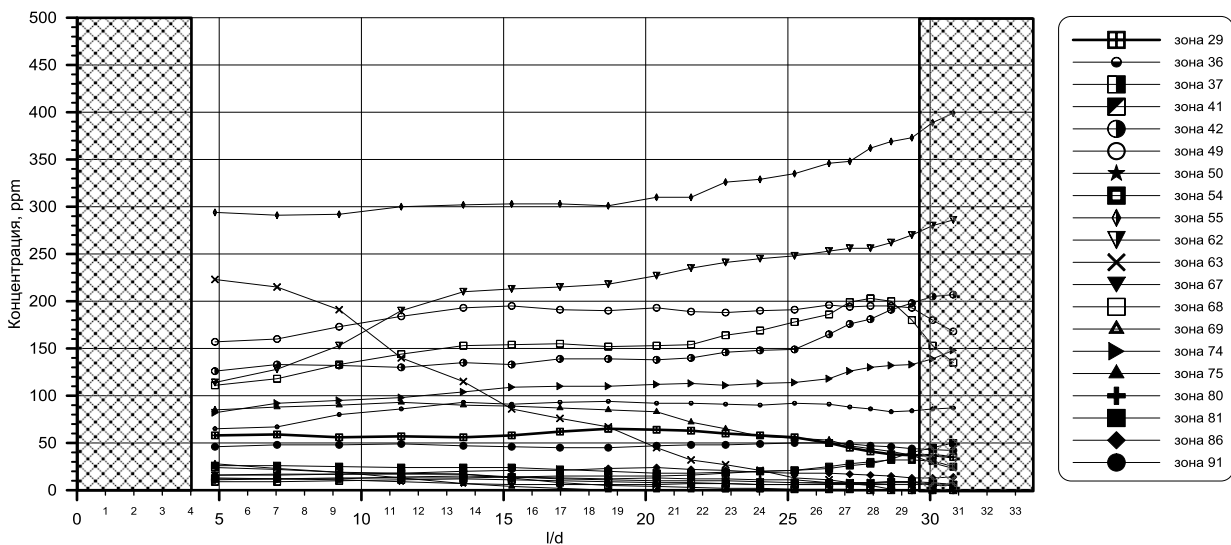


Рис. 7. Распределение концентрации трассера за дистанционирующей решеткой ЭМ

2. За ДР максимум концентрации трассера наблюдается сразу за решеткой (рис. 8) и далее по длине не переходит в другие ячейки. Это свидетельствует о том, что воздействие deflectоров на поток теплоносителя за ДР прекращается и дальнейшее перемешивание осуществляется посредством механизма турбулентной диффузии. Исходя из этого, можно сделать вывод: ДР, расположенная после ПР, сглаживает возмущения массообменных характеристик, вносимых перемешивающей решеткой. Это приводит к уменьшению глубины распространения трассера в поперечном сечении ЭМ и, как следствие, к снижению эффективности перемешивающих решеток как интенсификаторов массообмена.

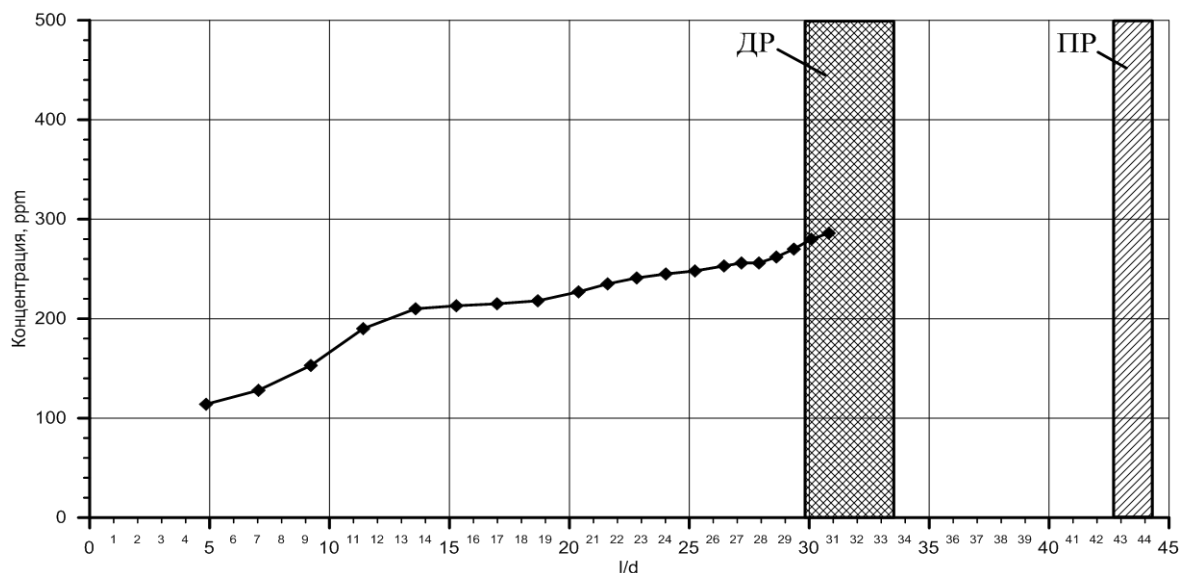


Рис. 8. Распределение концентрации трассера по длине ЭМ за ДР

При анализе массообменных характеристик теплоносителя в области НК выявлено, что трассер в данной области распространяется посредством механизма турбулентной диффузии, поскольку в районе НК отсутствуют deflectора.

На рис. 9 представлен график изменения относительного расхода теплоносителя за поясом ПР по длине экспериментальной модели.

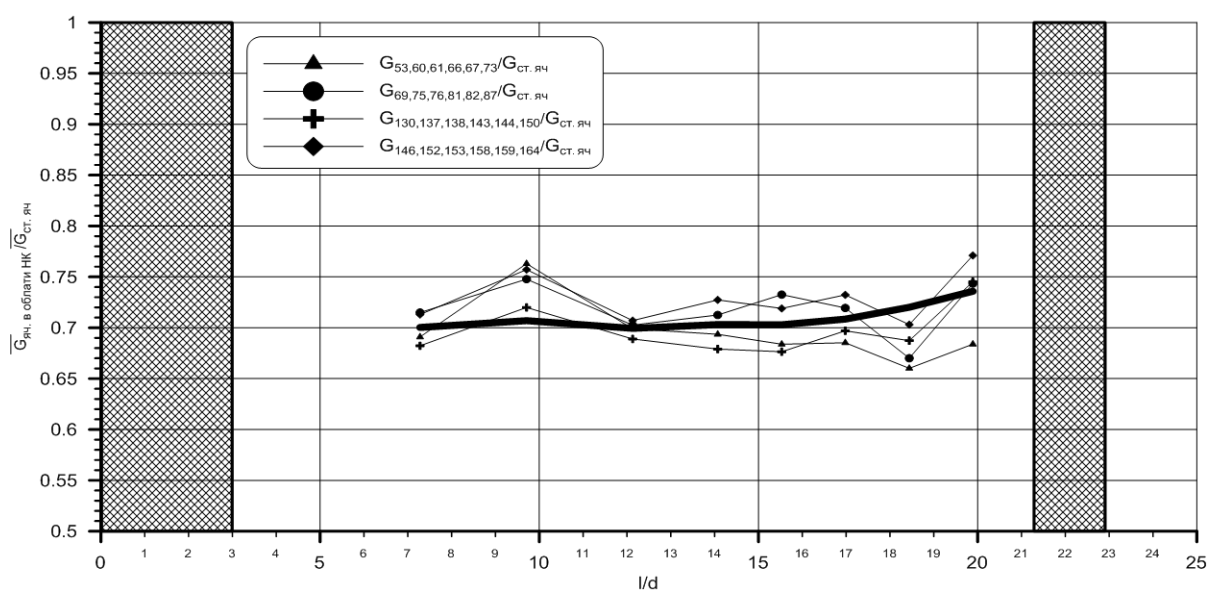


Рис. 9. Отношение распределения расхода теплоносителя через ячейки, прилежащие к НК, к стандартным ячейкам

Из данного графика видно, что часть потока в ячейках, прилежащих к НК, перераспределяется в соседние стандартные ячейки. Значения расхода в ячейках, прилежащих к НК, в среднем на (25-30)% меньше по сравнению с расходом теплоносителя через стандартные ячейки.

Выводы

По результатам экспериментальных исследований гидродинамики и массообмена в модели фрагмента активной зоны реактора ВВЭР–300 были выявлены основные закономерности движения потока теплоносителя:

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

2. Не весь трассер движется в направлении, определенном дефлектором. Часть трассера передается в соседние ячейки за счет турбулентного массообмена, имеющего значительно большую величину за перемешивающей решеткой вследствие дополнительной турбулизации потока.

3. Распределение концентрации трассера в ячейках, прилежащих к НК, осуществляется посредством механизма турбулентной диффузии, поскольку в районе НК отсутствуют перемешивающие дефлекторы.

4. Наличие дистанционирующей решетки, расположенной после перемешивающей решетки, приводит к сглаживанию возмущений массообменных характеристик, вносимых перемешивающей решеткой. Это приводит к уменьшению глубины распространения трассера в поперечном сечении экспериментальной модели и, как следствие, к снижению эффективности перемешивающих решеток как интенсификаторов массообмена.

5. Значения расхода в ячейках, прилежащих к НК, в среднем на (25-30)% меньше по сравнению с расходом теплоносителя через стандартные ячейки. Часть потока в ячейках, прилежащих к НК, перераспределяется в соседние стандартные ячейки.

Полученные результаты могут быть использованы в качестве базы экспериментальных данных для верификации CFD-кодов и программ детального поячеечного расчета активных зон водо-водяных ядерных реакторов.

Библиографический список

1. **Бородин, С.С.** Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР / С.С. Бородин [и др.] // Атомная энергия. 2012. Т. 113. Вып. 5. С. 252–257.
2. **Бородин, С.С.** Экспериментальные исследования локального массообмена теплоносителя в ТВС-КВАДРАТ реакторов типа PWR / С.С. Бородин [и др.] // Труды Нижегород. гос. техн. ун-та им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2010. №3. С. 106–112.
3. **Бородин, С.С.** Особенности локальной гидродинамики и массообмена теплоносителя в ТВС реакторов ВВЭР и PWR с перемешивающими решетками / С.С. Бородин [и др.] // Тепловые процессы в технике. – Москва: Наука и Технологии, 2013. Т. 5. Вып. 3. С. 98–107.
4. **Варенцов, А.В.** Экспериментальное исследование локального массообмена и оценка эффективности перемешивания дистанционирующих решеток в ТВС реактора КЛТ-40С / А.В. Варенцов [и др.] // Наука и технологии: матер. XXXII Всерос. конф. по пробл. науки и технологий. – Миасс: МСНТ, 2012. С. 111–113.

*Дата поступления
в редакцию 30.04.2013*

S.S. Borodin¹, A.V. Varentsov¹, D.V. Doronkov¹, A.N. Pronin¹, G.H. Iksanova²

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF FLOW HYDRODYNAMICS AND MASS TRANSFER TO THE COOLANT FLOW IN THE CORE FRAGMENTS VBER-300

JSC «OKBM Afrikantov»¹,
Nizhniy Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev²

Purpose: Experimental research of local hydrodynamics and mass-transfer of coolant in the VBER-300 nuclear reactor FA.

Design/methodology/approach: The main method of investigation of hydrodynamics in the nuclear reactor FA is an experimental research of full-size fuel assemblies and cores models on aero- and hydrodynamics stands. Researches of coolant local hydrodynamics are based on measurements of local velocity vectors with five-hole pressure probe inside experimental model.

Findings: Characteristics of local hydrodynamics coolant flow in VBER-300 reactor fuel assembly were defined. Features of coolant stream behind spacer grid and mixing grid were revealed. Experimental researches of local velocity fields in standard cells, cells around displacer and peripheral cells of FA allowed to define distribution of coolant expense in FA, what plays important role at calculation of a temperature field in core of the reactor/

Research limitations/implications: The special databank was created basing on the experimental results. The data are used for verifying CFD-codes to reduce conservatism on esteeming the VBER-300 reactor heat engineering reliability. The results of the research were accepted and are used now by JSC OKBM Afrikantov.

Originality/value: Originality of this article is in local hydrodynamics of coolant research, and revealing features and conformity of coolant flow in the nuclear reactor FA to physical laws. Therefore we can prove heat engineering reliability of the VBER-300 reactor core.

Key words: nuclear reactor, fuel assembly, hydrodynamics of coolant, mixing grid.