

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 621.039

**В.Е. Бородина, Д.В. Доронков, М.А. Легчанов, Е.Н. Полозкова,
А.Н. Пронин, А.Е. Хробостов**

ИССЛЕДОВАНИЯ МЕЖКАССЕТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ МЕЖДУ СОСЕДНИМИ ТВСА–12 PLUS АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА ВВЭР-1000

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Проведены экспериментальные исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя между соседними ТВСА–12 PLUS реактора ВВЭР. Выявлены особенности течения потока теплоносителя при межкассетном взаимодействии между соседними кассетами ТВСА.

Ключевые слова: ядерный реактор, тепловыделяющая сборка, межъячеечный массообмен, межкассетное взаимодействие, дистанционирующие и перемешивающие решетки.

Введение

Тенденции развития ядерной отрасли Российской Федерации диктуют необходимость создания энергоблоков, способных на максимально эффективное производство электроэнергии при условии гарантированной безопасности. Необходимо постепенно и поэтапно модернизировать отдельные элементы реакторной установки, а также повышать их технологические и эксплуатационные параметры.

В ОАО «ОКБМ Африкантов» на протяжении многих лет проводятся работы по усовершенствованию конструкций активных зон водо-водяных ядерных реакторов в целом так и тепловыделяющих сборок (ТВС). Работы в этом направлении ведутся для решения следующих основных задач: реализации безопасных и экономически эффективных топливных циклов, повышения эксплуатационного ресурса активных зон, обеспечения геометрической стабильности конструкции ТВС и повышения их эксплуатационной надежности [1].

Одно из перспективных направлений решения поставленных задач – улучшение теплогидравлических характеристик ТВС. С этой целью была создана ТВСА-12 PLUS, которая характеризуется оптимизированным размещением дистанционирующих решеток (ДР) и применением перемешивающих решеток (ПР) с размещением дефлекторов по схеме «порядная прогонка» [2].

Поскольку ТВСА-12 PLUS является бесчехловой, то перемешивание теплоносителя происходит не только в пределах одной кассеты, но и между соседними топливными сборками. Данное явление необходимо учитывать в процессе оценки и обоснования теплотехнической надежности активной зоны реактора ВВЭР, что обусловило необходимость проведения комплекса исследований закономерностей перераспределения теплоносителя при межкассетном взаимодействии между двумя кассетами ТВСА [3].

Экспериментальный стенд

Для исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР в НГТУ им. Р.Е. Алексеева был создан аэродинамический экспериментальный стенд, представляющий собой разомкнутый контур, через который прокачивается воздух [4]. В состав

стенда входят: вентилятор высокого давления, ресиверная емкость, экспериментальная модель (ЭМ), расходомерное устройство, система подачи и отбора трассера, измерительный комплекс.

Экспериментальная модель представляет собой фрагмент активной зоны реактора ВВЭР, включающей в себя сегменты трех топливных кассет ТВСА-12 PLUS и межкассетное пространство. Выполнена ЭМ с соблюдением полного геометрического подобия и состоит из шестигранного чехла, 94 твэлов-имитаторов, уголков жесткости, поясов дистанционирующих и перемешивающих решеток.

Измерительный комплекс

В состав измерительного комплекса входят: газоанализатор, расходомер газа, ЭВМ с программным обеспечением, трубка Пито-Прандтля, блок аналоговых преобразователей давления.

Измерения концентрации углеводородов C_nH_m в газо-воздушной смеси осуществлялось газоанализатором. Принцип измерения C_nH_m основан на измерении величины поглощения инфракрасного излучения. Диапазон измеряемых концентраций 0 – 10000 ppm, погрешности измерений с учетом индивидуальной градуировки равны ± 15 ppm (0 – 1000 ppm) и $\pm 1,5\%$ (1000 – 10000 ppm) [5].

Поддержание заданного расхода газа-трассера осуществлялось массовым расходомером, позволяющим измерять и регулировать потоки газов. Погрешность составляла не более 0,5%.

Отбор проб трассера в газоанализатор осуществлялся с помощью отборного зонда выполненного в виде трубки Пито-Прандтля, с помощью которого также можно определить значение осевой скорости потока. Снятие показаний с трубки Пито-Прандтля производилось блоком аналоговых преобразователей давления. Предел допускаемой основной погрешности данных приборов составляет $\pm 0,25\%$.

Методика исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР

Для изучения межкассетного взаимодействия теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР применяется метод диффузии примесей [6]. 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 и не приводит к искажению картины течения теплоносителя.

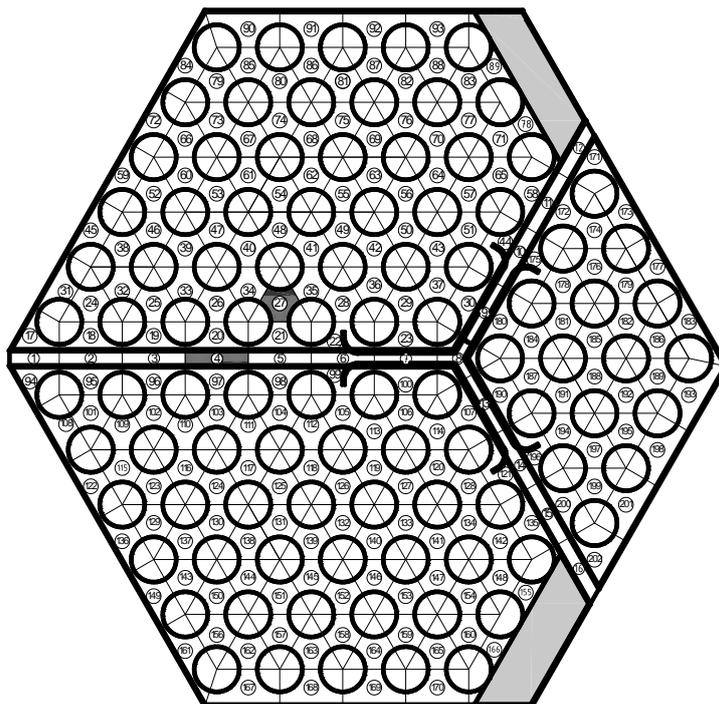


Рис. 1. Поперечное сечение ЭМ

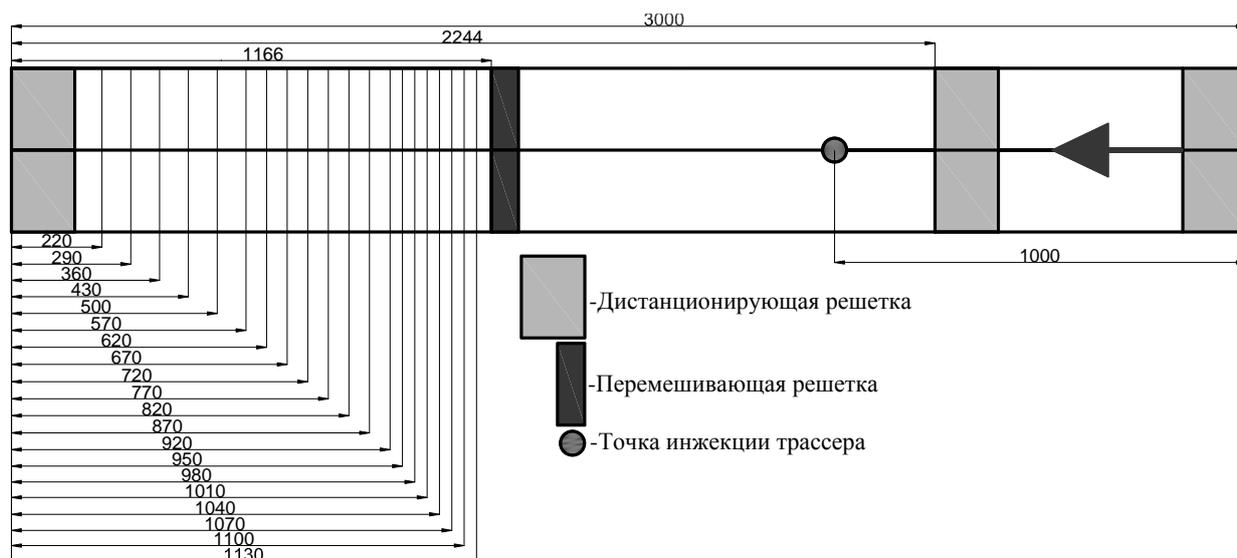


Рис. 2. Продольное сечение ЭМ

Методика проведения исследований локального массообмена теплоносителя заключалась в следующем: газовый трассер через впускной зонд подавался в характерную ячейку ЭМ до пояса ПР по ходу течения потока теплоносителя (рис. 1); с помощью отборного зонда производился замер концентрации трассера газоанализатором по центрам всех ячеек за исследуемым поясом ПР в характерных сечениях по длине ЭМ (рис. 2); затем на основе полученных данных строились картограммы и графики зависимости распределения концентрации трассера от относительной координаты для характерных зон поперечного сечения ЭМ. По полученным картограммам и графикам была выявлена картина течения потока.

Результаты исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя между соседними ТВСА-12 PLUS

Комплексный анализ результатов экспериментальных исследований межкассетного взаимодействия между соседними ТВСА-12 PLUS при подаче трассера в межкассетный зазор позволил заключить следующее:

1. В области межкассетного зазора происходит процесс вытеснения части потока теплоносителя из-под уголков жесткости (рис. 3).

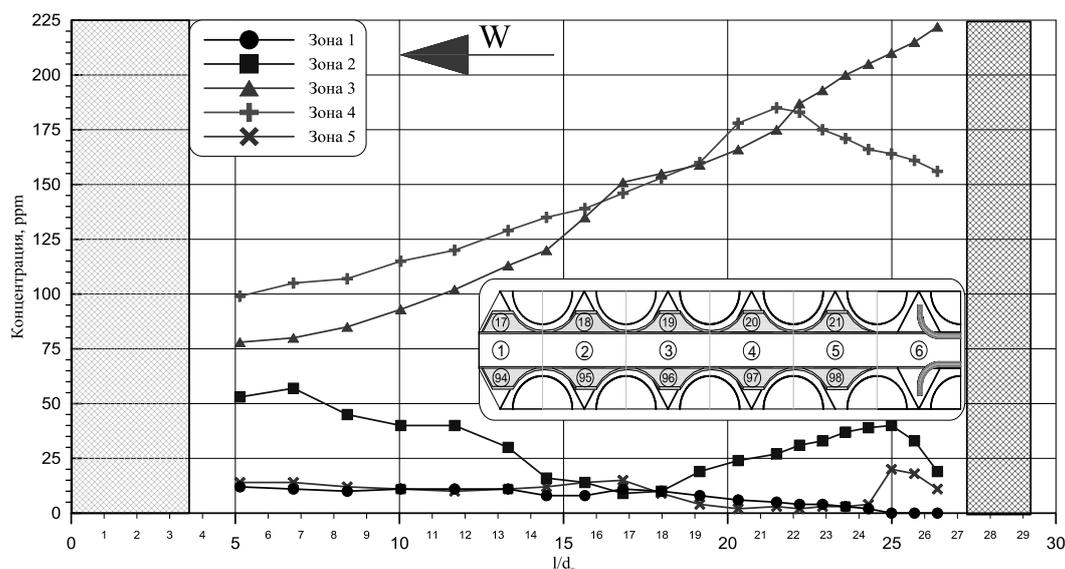


Рис. 3. Распределение концентрации трассера по длине ЭМ для ячеек № 1, 2, 3, 4, 5 при подаче трассера в межкассетный зазор ($\bar{w}=28,16$ м/с, $Re=80100$)

2. В области периферийного ряда твэлов, прилежащей к межкассетному зазору, на движение потока теплоносителя, помимо дефлекторов, оказывают влияние зубчатые края обода ПР. Интенсивность массообменных процессов в области периферийного ряда твэлов кассет выше в тех ячейках, где ориентация турбулизирующих дефлекторов и зубчатых краев обода ПР совпадает (рис. 4).

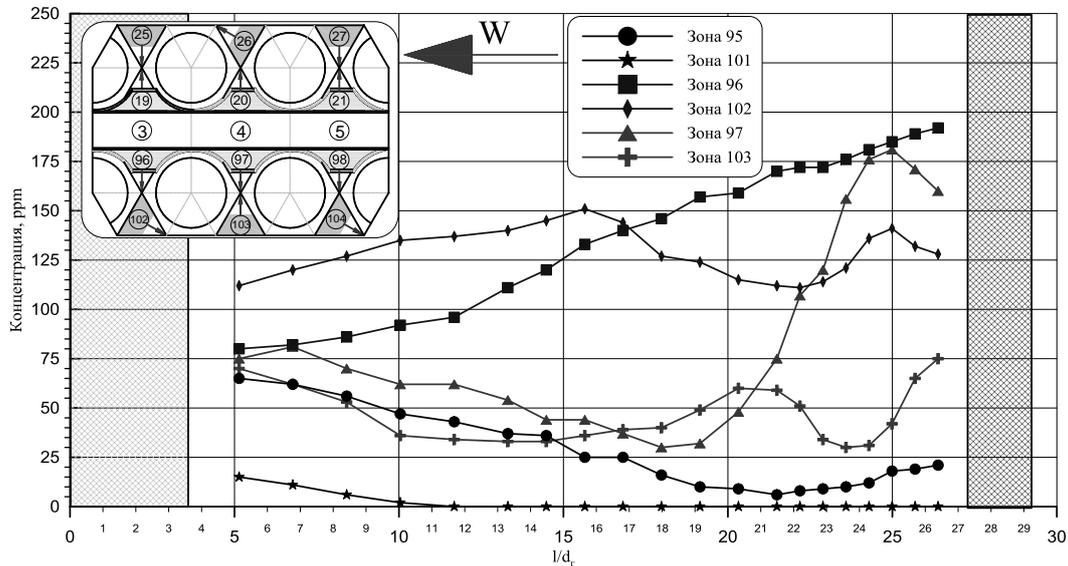


Рис. 4. Распределение концентрации трассера по длине ЭМ для ячеек № 95, 101, 96, 102, 97, 103 при подаче трассера в межкассетный зазор ($\bar{w}=28,16$ м/с, $Re=80100$)

3. Определено, что перераспределение потока теплоносителя из области межкассетного зазора в соседние ТВСА-12 PLUS охватывает два периферийных ряда твэлов (рис. 5).

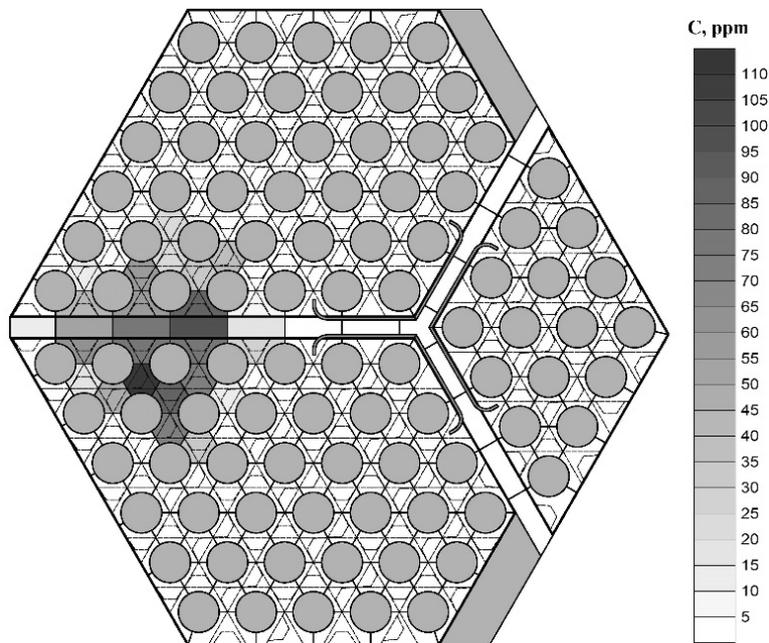


Рис. 5. Распределение концентрации трассера в выходном сечении ЭМ при подаче трассера в межкассетный зазор ($\bar{w}=28,16$ м/с, $Re=80100$)

Анализ результатов исследований межкассетного взаимодействия между соседними ТВСА-12 PLUS при подаче трассера в периферийную ячейку кассеты позволил заключить следующее:

1. Трассер из зоны подачи распространился в соседнюю кассету ТВСА-12 PLUS, охватив два периферийных ряда твэлов (рис. 6). Данный факт говорит о "существенном" перераспределении теплоносителя при межкассетном взаимодействии между двумя ТВСА-12 PLUS.

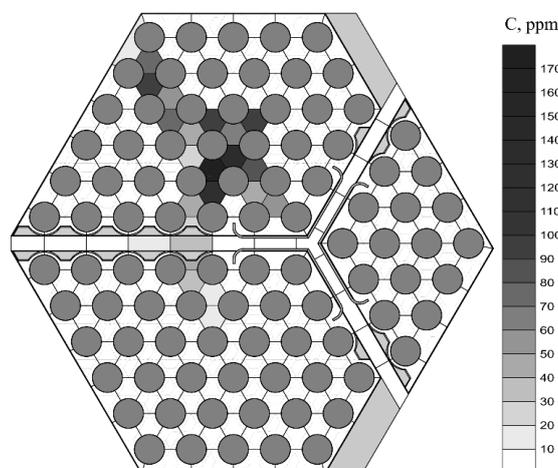


Рис. 6. Распределение концентрации трассера в выходном сечении ЭМ при подаче трассера в периферийную ячейку кассеты ($\bar{w}=28,16$ м/с, $Re=80100$)

2. В области периферийного ряда твэлов ТВСА-12 PLUS наблюдается направленное внутрь кассеты движение потока теплоносителя, обусловленное соответствующим расположением зубчатых краев обода ПР. Данное явление негативно сказывается на интенсивности межкассетного взаимодействия теплоносителя между соседними кассетами ТВСА-12 PLUS (рис. 7).

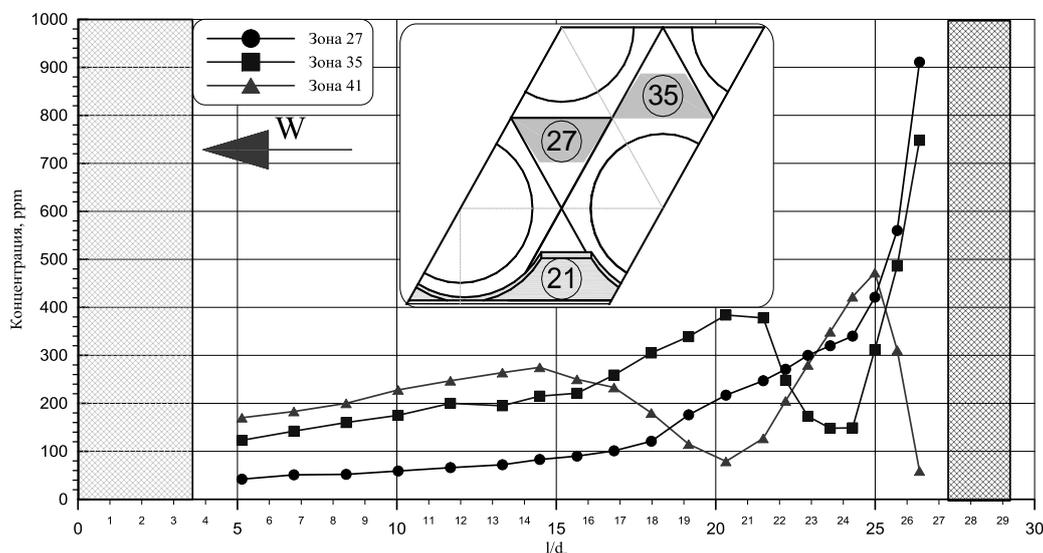


Рис. 7. Распределение концентрации трассера по длине ЭМ для ячеек № 27, 35, 21 при подаче трассера в периферийную ячейку кассеты ($\bar{w}=28,16$ м/с, $Re=80100$)

3. Анализ распределения расхода теплоносителя проводился в области межкассетного зазора и периферийного ряда твэлов кассет ТВСА-12 PLUS. Определяя осевую скорость и, учитывая площадь проходного сечения ячеек, были рассчитаны расходы теплоносителя через ячейки выбранной области.

В конструкции ПР ТВСА-12 PLUS имеется два варианта взаимного расположения дефлектора и зубчатого края обода ПР (рис. 8), которые организуют течение потока теплоносителя в области межкассетного зазора.

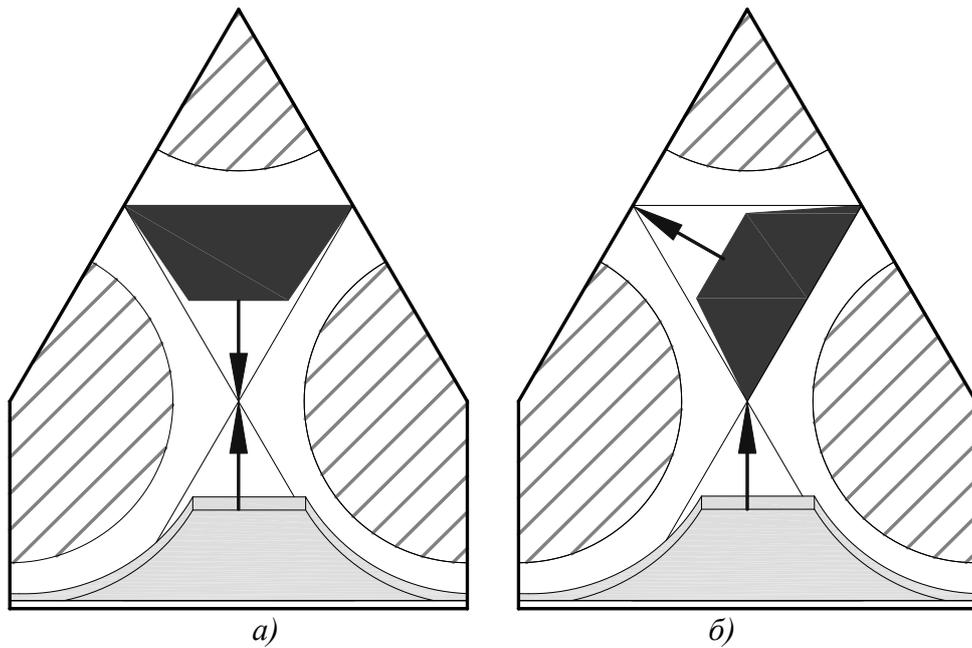


Рис. 8. Участки периферийной области кассеты TBСA-12 PLUS с различным взаимным расположением дефлектора и зубчатых краев обода ПР:
 а – область противоположным расположением дефлектора и края обода ПР;
 б – с сонаправленным расположением дефлектора и края обода ПР

Анализ распределения расходов теплоносителя через ячейки области межкассетного зазора позволил заключить следующее:

1. В области периферийного ряда твэлов кассеты TBСA-12 PLUS с противоположным расположением дефлектора и зубчатого края обода ПР наблюдается уменьшение расхода теплоносителя на 10% (рис. 9).
2. В области периферийного ряда твэлов кассеты TBСA-12 PLUS с сонаправленным расположением дефлектора и зубчатого края обода ПР наблюдается увеличение расхода теплоносителя на 10% (рис. 10).

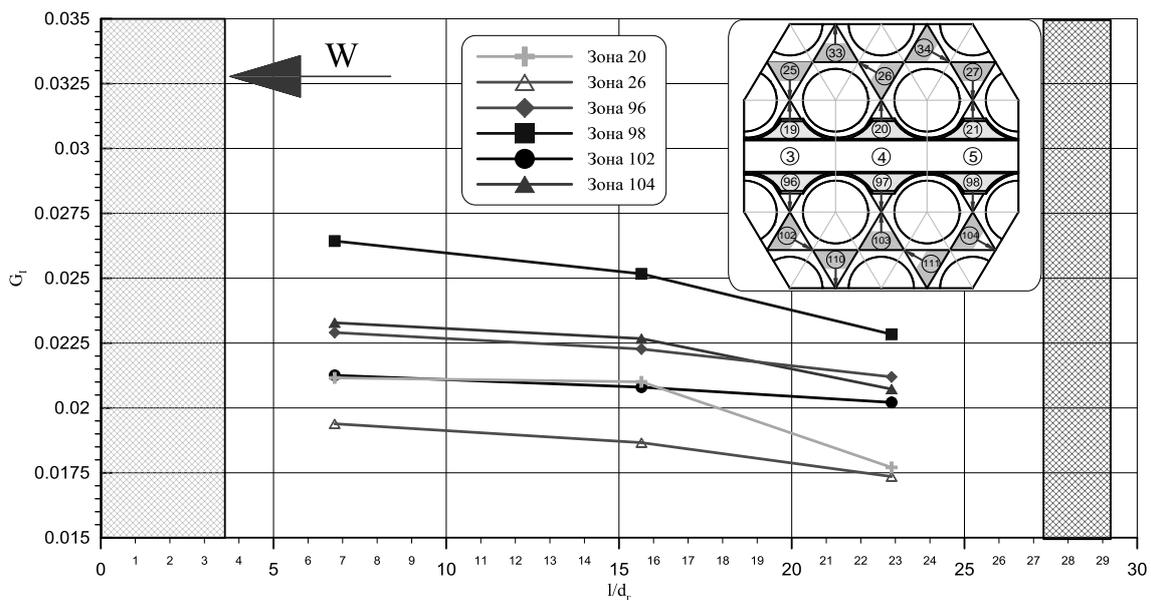


Рис. 9. Распределение расхода теплоносителя через ячейки №20, 26, 96, 98, 102, 104 верхней кассеты TBСA-12 PLUS ($w=28,16$ м/с, $Re=80100$)

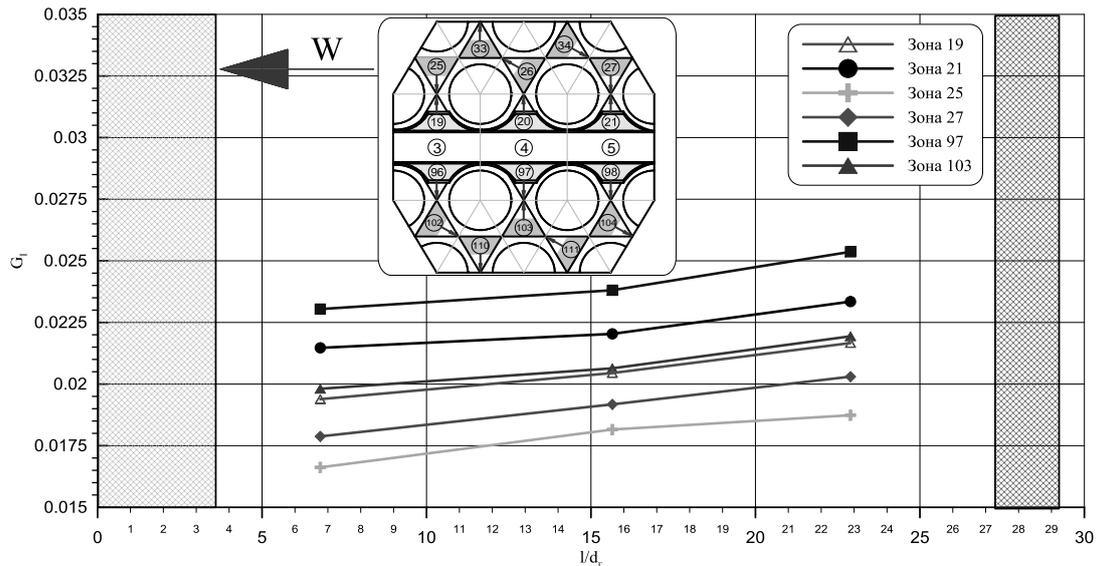


Рис. 10. Распределение расхода теплоносителя через ячейки №19, 21, 25, 27, 97, 103 верхней кассеты ТВСА-12 PLUS ($\bar{w}=28,16$ м/с, $Re=80100$)

Выводы

На основе комплексного анализа экспериментальных данных по исследованию межкассетного взаимодействия теплоносителя между соседними ТВСА-12 PLUS сделаны следующие выводы:

1. В области периферийного ряда твэлов кассет ТВСА-12 PLUS наблюдается направленное движение потока теплоносителя, обусловленное соответствующим расположением зубчатых краев обода перемешивающей решетки.
2. Интенсивность массообменных процессов в области периферийного ряда твэлов кассет выше в тех ячейках, где ориентация турбулизирующих дефлекторов и зубчатых краев обода перемешивающей решетки совпадает.
3. В области межкассетного зазора происходит вытеснение части потока теплоносителя из-под уголков жесткости кассет ТВСА-12 PLUS.
4. Глубина распространения газа трассера из межкассетного зазора в соседние ТВСА-12 PLUS охватывает область двух периферийных рядов твэлов.
5. В межкассетном зазоре аксиальная составляющая вектора скорости на 10–15% больше аксиальной составляющей вектора скорости в стандартной ячейке.
6. В области периферийного ряда твэлов кассеты ТВСА-12 PLUS с противоположным расположением дефлектора и зубчатого края обода ПР наблюдается уменьшение расхода теплоносителя на 10%, а в областях с сонаправленным расположением дефлектора и зубчатого края обода ПР наоборот.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0124 от 3 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. 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.

3. К вопросу о методологии обоснования теплотехнической надежности активных зон водяных энергетических реакторов / А.А. Баринов [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. №2. С. 98–108.
4. Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в ТВС-Квадрат реакторов PWR с перемешивающими решетками / А.В. Варенцов [и др.] // Теплоэнергетика. 2014. №8. С. 20–27.
5. Особенности локальной гидродинамики и массообмена теплоносителя в ТВС реакторов ВВЭР и PWR с перемешивающими решетками / С.С. Бородин [и др.] // Тепловые процессы в технике. 2013. Т. 5. Вып. 3. С. 98–107.
6. **Жуков, А.В.** Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов: Теоретические основы и физика процесса / А.В. Жуков, Н.М. Матюхин, А.П. Сорокин. – М.: Энергоатомиздат. 1989.

*Дата поступления
в редакцию 10.02.2012*

**V.E. Borodina, D.V. Doronkov, M.A. Legchanov, E.N. Polozkova, A.N. Pronin,
A.E. Khrobostov**

RESEARCHES OF INTERASSEMBLY INTERACTION OF COOLANT BETWEEN NEIGHBOURING TVSA-12 PLUS OF WWER-1000 REACTOR CORE

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

Purpose: The main aim of research was to expose characteristics of interassembly interaction of coolant flow in fuel assemblies of the TVSA-12 PLUS.

Design/methodology/approach: The main method of hydrodynamics and mass transfer in the nuclear reactor FA investigation is an experimental research of scale cassette model and active zones of aero- and hydrodynamics stands. For the local characteristics of intercellular mass transfer and hydrodynamics of the heat carrier in the TVSA-12 PLUS research the gas diffusion method was used.

Findings: Experimental researches of heat carrier's hydrodynamics and mass transfer in the experimental model were organized. The features of interassembly interaction of coolant flow in fuel assemblies of the TVSA-12 PLUS were revealed.

Research limitations/implications: The obtained experimental information has been generalized, and a data bank for verifying CDF codes and computer programs for cell-wise calculations for reactor cores with FA has been established. Investigations results are used to specify local hydrodynamics and mass transfer characteristics of coolant flow when assessing heat engineering reliability of WWER reactor core.

Originality/value: Topically of this article is in heat carrier mass transfer research in the nuclear reactor FA to physical laws. Therefore we can prove heat engineering reliability of the WWER-1000 reactor active zone.

Key words: nuclear reactor, fuel assembly, intercell mass transfer, interassembly interaction, spacing grid, mixing grid.