

УДК 621.039

**П.В. Арсенов, А.В. Варенцов, Д.В. Доронков, К.С. Коновалов,
Е.Н. Полозкова, А.Е. Хробостов**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ
ГИДРОДИНАМИКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ТВС-КВАДРАТ РЕАКТОРА PWR
ПРИ ПОСТАНОВКЕ ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕЙ ДИСТАНЦИОНИРУЮЩЕЙ РЕШЕТКИ
С «ДЕФЛЕКТОРАМИ УВЕЛИЧЕННОЙ ПЛОЩАДИ»**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведены результаты экспериментальных исследований локальной гидродинамики теплоносителя в тепловыделяющих сборках реакторов PWR за перемешивающей дистанционирующей решеткой, снабженной дефлекторами увеличенной площади. Исследования проводились на аэродинамическом стенде методом диффузии газового трассера. Анализ результатов исследований течения теплоносителя в пучках твэлов ТВС–КВАДРАТ позволяет выявить ряд особенностей, важных для оценки эффективности перемешивающих решеток. Полученные результаты используются для уточнения локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя при обосновании теплотехнической надежности активных зон реакторов PWR, являются базой данных для верификации CFD-кодов и программ детального поэлементного расчета активных зон ядерных реакторов с ТВС–КВАДРАТ.

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

В АО «ОКБМ Африкантов» разработана конструкция ТВС–КВАДРАТ для активной зоны реакторов типа PWR, конкурентоспособная с зарубежными аналогами по надежности, безопасности, экономичности и технологичности. В частности, в конструкции ТВС–КВАДРАТ использованы апробированные и зарекомендовавшие себя в ТВС для реакторов ВВЭР конструкторские решения по силовому каркасу и дистанционирующей решетке, которые позволяют повысить эксплуатационную надежность ядерного топлива [1].

Одна из конструктивных особенностей ТВС–КВАДРАТ – наличие перемешивающих дистанционирующих решеток (ПДР) и перемешивающих решеток (ПР), одними из функций которых являются турбулизация потока теплоносителя и интенсификация процессов теплообмена. Установка подобных элементов влияет на эффективность перемешивания теплоносителя и, как следствие, на величину критических тепловых потоков и запаса до кризиса теплоотдачи. В поперечном сечении кассеты условно выделяют две характерные области: область стандартных ячеек и ячейки в районе направляющего канала (НК). В данных областях, различающихся геометрическими характеристиками, параметрами теплового потока и формированием потока теплоносителя, важно знать локальные гидродинамические характеристики.

В настоящее время в конструкции отечественной ТВС–КВАДРАТ планируется применение решеток с новыми дефлекторами увеличенной площади, что требует обоснования теплотехнической надежности активных зон и определения влияния конструкции решеток на гидродинамику теплоносителя.

Изучение гидродинамики пучков твэлов и активных зон реакторов целесообразно проводить на масштабных и полноразмерных моделях кассет и активных зон на аэро- и гидродинамических стендах. Ввиду этого экспериментальное исследование локальных характеристик потока является актуальной задачей, решение которой позволяет обосновать теплотехническую надежность активных зон реакторов PWR [2].

Описание экспериментального стенда

Исследования проводились на экспериментальном стенде, представляющем собой аэродинамический разомкнутый контур, через который прокачивается воздух [3]. Экспериментальная модель, представляющая собой 49–стержневой фрагмент ТВС–КВАДРАТ реак-

тора PWR, выполнена с коэффициентом геометрического подобия $K_{\Gamma}=4,2$, и состоит из твэлов-имитаторов, имитаторов направляющего канала, поясов дистанционирующих и перемешивающих решеток [4]. Исследуемые пояса выполнены в виде пластинчатых решеток, их верхние кромки снабжены дефлекторами увеличенной площади.

Измерительный комплекс

В состав измерительного комплекса входят: газоанализатор, расходомер газа EL-FLOW, сигнализатор концентрации газа X 22.1, ПЭВМ с соответствующим программным обеспечением, трубки Пито-Прандтля, блок аналоговых преобразователей давления.

Измерение концентрации углеводородов C_nH_m в газо-воздушной смеси осуществлялось с помощью газоанализатора. Погрешность измерения при этом составляет $\pm 1,5\%$ (1000...10000 ppm). Для поддержания заданного расхода газа использовался массовый расходомер EL-FLOW, погрешность составляет не более 0,5%. Для определения градиента перераспределения концентрации из зоны подачи трассера в соседние ячейки изготовлено два измерительных твэл-имитатора. На каждый твэл-имитатор крепились 15 Г-образных отборных штуцеров (рис. 1). Затеснение проходного сечения характерной ячейки Г-образными штуцерами не превышает 2%.



Рис. 1. Общий вид твэл-имитаторов с устройствами отбора трассера

Снятие показаний с трубки Пито-Прандтля производилось блоком аналоговых преобразователей давления, представляющих собой набор преобразователей избыточного давления САПФИР-22Р-ДИ и разности давлений САПФИР-22Р-ДД. Диапазон измерений данных преобразователей 0-4 кПа. Предел допускаемой основной погрешности составляет $\pm 0,25\%$.

Методики исследования гидродинамики теплоносителя на экспериментальном стенде

Изучение картины течения потока теплоносителя в экспериментальной модели проводили методом диффузии примесей (метод трассера). Метод основан на регистрации поперечного потока массы по некоторой переносимой субстанции (краски, соли, газа и т.д.). В качестве трассера использовался газ пропан, поскольку он обладает наиболее близкими к воздуху свойствами, возможностью быстрой и достаточно точной регистрации, что позволяет получать большие объемы данных в ограниченное время.

Изложим методику проведения экспериментальных исследований локальной гидродинамики на экспериментальном стенде:

1. Поперечное сечение ЭМ разбивается на ячейки, каждой из которых присваивается свой индивидуальный порядковый номер (рис. 2).

2. Газовый трассер через впускной зонд подается в характерную ячейку ЭМ до пояса перемешивающей дистанционирующей решетки по ходу течения потока теплоносителя. Далее с помощью двух измерительных твэлов-имитаторов производится замер концентрации трассера газоанализатором во всех ячейках за поясом ПДР и в характерных сечениях по длине ЭМ.

3. По полученным данным строятся картограммы и графики зависимости распределения концентрации трассера от относительной координаты для характерных зон поперечного сечения ЭМ.

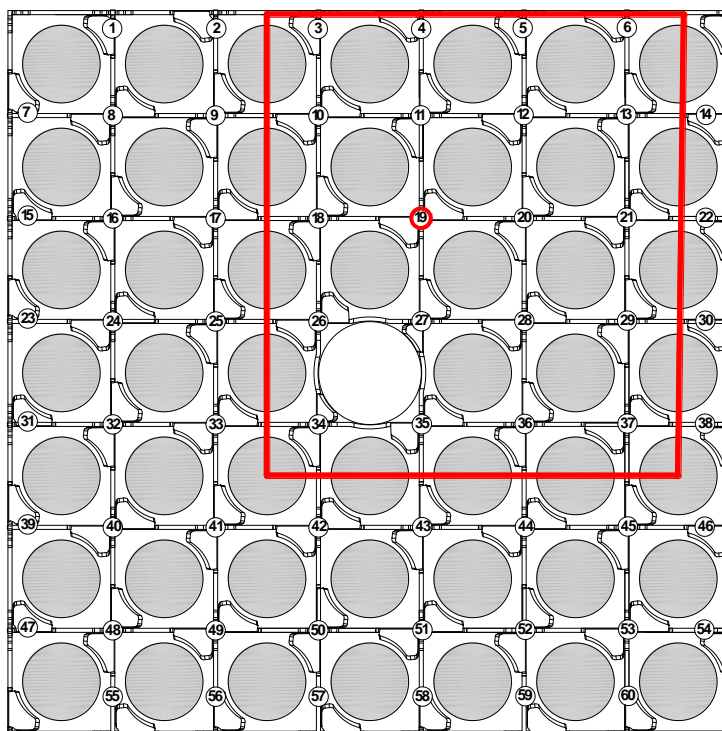


Рис. 2. Поперечное сечение экспериментальной модели ТВС-КВАДРАТ с указанием зоны подачи газового трассера 19 и исследуемой области

Определение расхода теплоносителя в отдельных ячейках экспериментальной модели производилось измерением осевой скорости по центрам ячеек трубкой Пито-Прандтля.

Расходы через исследуемые ячейки Гяч ЭМ определяются по формуле (1.1), а среднеинтегральные скорости через ячейки по формуле (1.2):

$$G_{\text{яч}} = \int_0^{F_{\text{яч}}} W_i \cdot dF \quad (1.1)$$

$$\bar{W}_{\text{яч}} = \frac{G_{\text{яч}}}{F_{\text{яч}}} \quad (1.2)$$

где $\bar{W}_{\text{яч}}$ – среднеинтегральная скорость в ячейке; $F_{\text{яч}}$ – площадь проходного сечения ячейки; W_i – скорость в i -й точке в ячейке.

Представительность исследований

Важным этапом проведения любого экспериментального исследования является подтверждение его представительности. В активной зоне реактора PWR число Рейнольдса достигает $4,5 \cdot 10^5$, что труднодостижимо в лабораторных условиях. Но поскольку течение воды высокого давления в моделях ТВС моделируется воздухом на основе теории гидродинамического подобия, то в области автомодельности профиль относительной скорости ($W_{\text{лок}}/W_{\text{ср.расх}}$) остается неизменным. Следовательно, исследования в зоне автомодельности позволят перенести результаты эксперимента на натурные условия течения теплоносителя в штатных ТВС. Соответственно для обоснования представительности исследований были проведены эксперименты по определению участков гидродинамической стабилизации потока и границ зон автомодельного течения [5].

Основной задачей исследования зоны автомодельности являлось нахождение нижней границы. Исследования в диапазоне чисел $Re=2 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^5$ заключались в построении эмпирической зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса. Согласно результатам, область автомодельного течения начинается в диапазоне чисел $Re = (8,5-9) \cdot 10^4$, что заведомо ниже числа Рейнольдса, достигаемого в экспериментальных исследованиях.

На аэродинамическом стенде были также экспериментально определены коэффициенты гидравлического сопротивления (КГС) исследуемой перемешивающей дистанционирующей решетки. Необходимость работ вызвана требованием соблюдения равенства местного гидравлического сопротивления натуральных решеток и решетки экспериментальной модели. Анализ результатов показывает, что конструкция перемешивающей решетки в диапазоне требуемых чисел Рейнольдса обеспечивают необходимое гидравлическое сопротивление, а их значения соответствуют гидравлическому сопротивлению натуральных решеток.

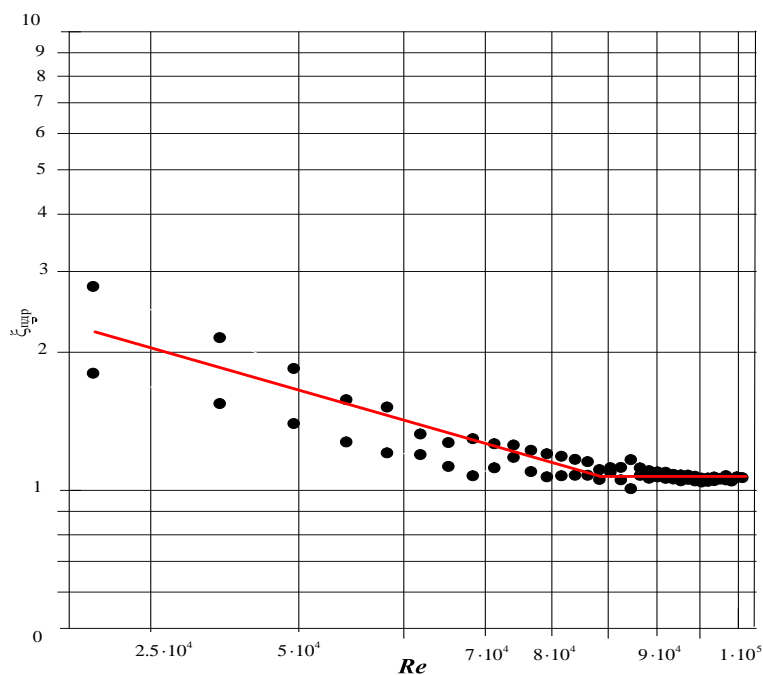


Рис. 3. Зависимость коэффициента местного гидравлического сопротивления перемешивающей решетки от числа Re

Результаты исследования распределения концентрации трассера

Комплексный анализ результатов измерения концентрации трассера по длине модели для характерных зон позволил выявить основные закономерности движения потока теплоносителя за поясом ПДР:

а) по построенным картограммам (рис. 4) и графику распределения концентрации трассера (рис. 5) видно симметричное распространение трассера из зоны подачи по направлению турбулизирующих дефлекторов. Такое движение продолжается на расстоянии $\Delta l/d=10$ после ПДР.

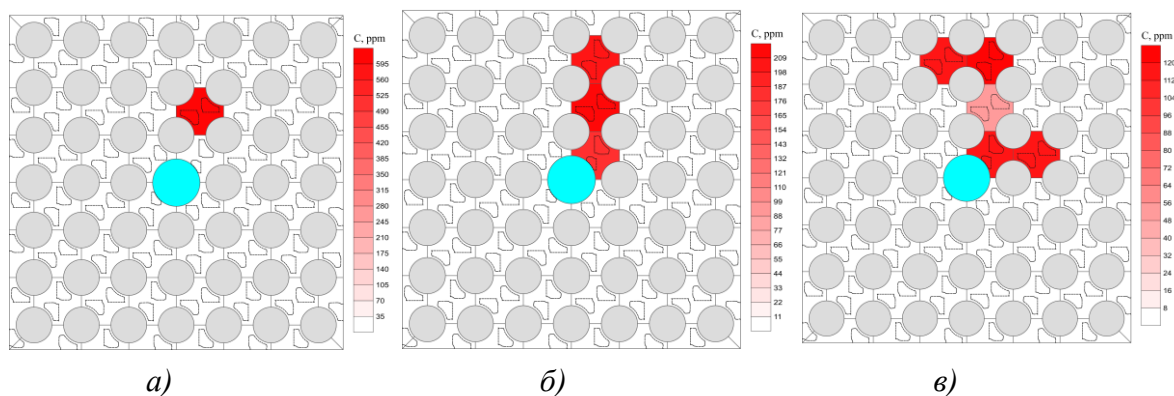


Рис. 4. Распределение концентрации трассера по сечению экспериментальной модели ($w = 33,29$ м/с, $Re=89000$):

$a - l/d = 1,24$; $b - l/d = 4,97$; $в - l/d = 8,7$

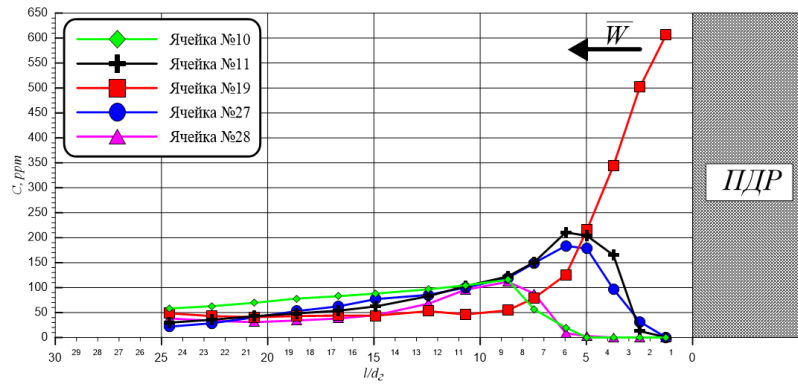


Рис. 5. График распределения концентрации трассера за поясом ПДР с дефлекторами увеличенной площади ($\bar{w} = 33,29$ м/с, $Re=89000$)

б) графики распределения концентрации трассера, представленные на рис. 6 и рис. 7, свидетельствуют о направленном, плавно затухающем движении потока теплоносителя согласно ориентации турбулизирующих дефлекторов.

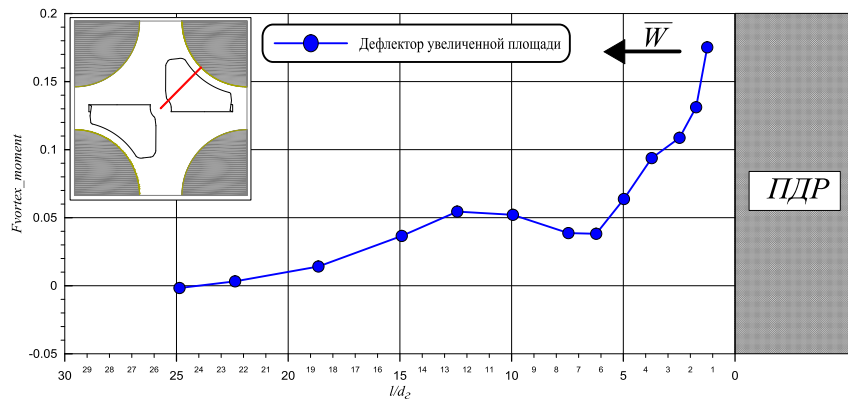


Рис. 6. График изменения коэффициента, определяющего интенсивность воздействия дефлекторов в исследуемой ячейке по соответствующему направлению

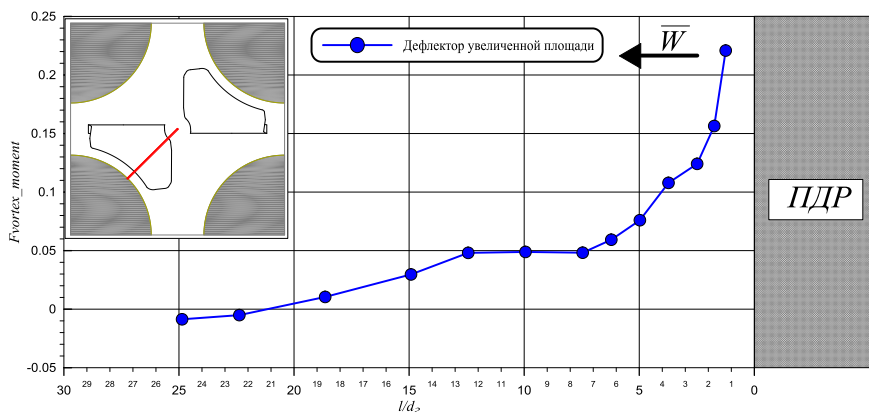


Рис. 7. График изменения коэффициента, определяющего интенсивность воздействия дефлекторов в исследуемой ячейке по соответствующему направлению

в) затухание массообменных процессов за поясом ПДР с дефлекторами увеличенной площади происходит на расстоянии $\Delta l/d_г=17\div 20$. В выходном сечении ЭМ трассер из зоны инъекции 19 распространился в 11 ячеек (рис. 8).

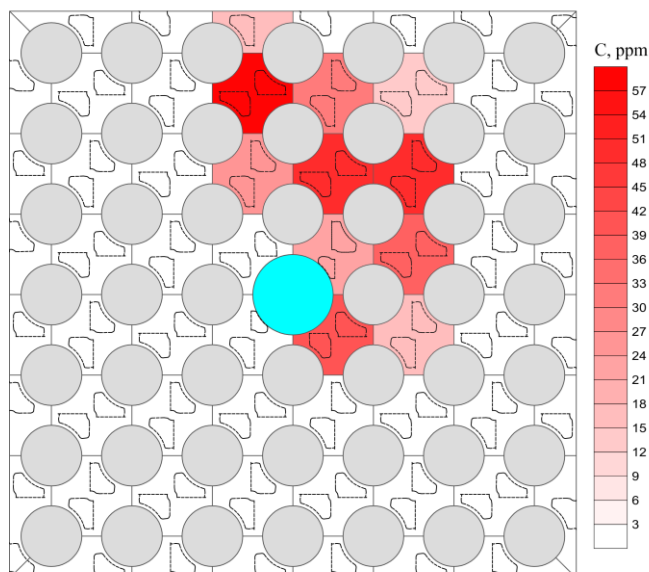


Рис. 8. Распределение концентрации трассера по сечению экспериментальной модели для $l/d = 24,61$ ($\bar{w} = 33,29$ м/с, $Re=89000$)

Обобщение результатов исследований для определения расхода теплоносителя в модели ТВС – КВАДРАТ

Экспериментальные исследования распределения осевой скорости, которые проводились в двух ячейках, прилежащих к направляющим каналам 26, 27, и в ячейке 33 (рис. 9), позволили определить перераспределение расхода теплоносителя в данной области, обусловленное различием в площадях проходного сечения ячеек, прилежащих к НК, по сравнению с площадью проходного сечения регулярной ячейки ТВС-КВАДРАТ и особенностями расположения дефлекторов в области НК (рис. 10).

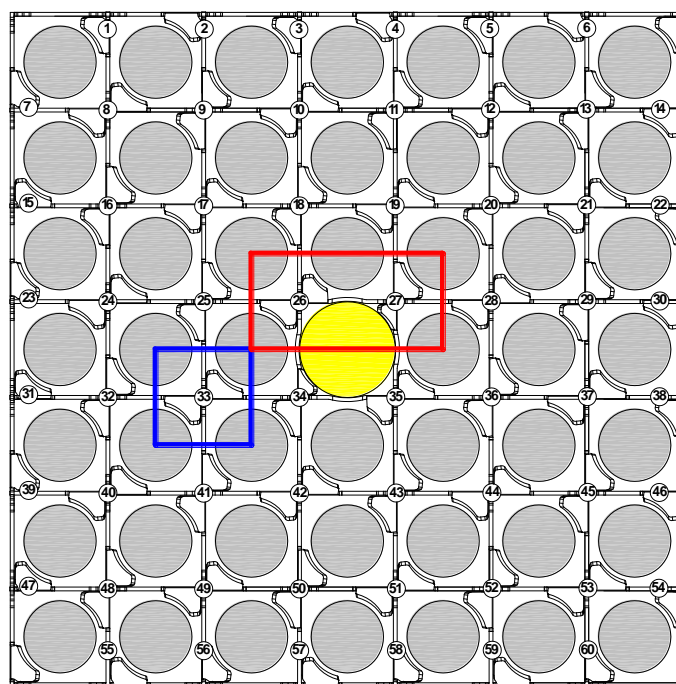


Рис. 9. Поперечное сечение экспериментальной модели ТВС-КВАДРАТ с указанием исследуемой ячейки 33, 26 и 27

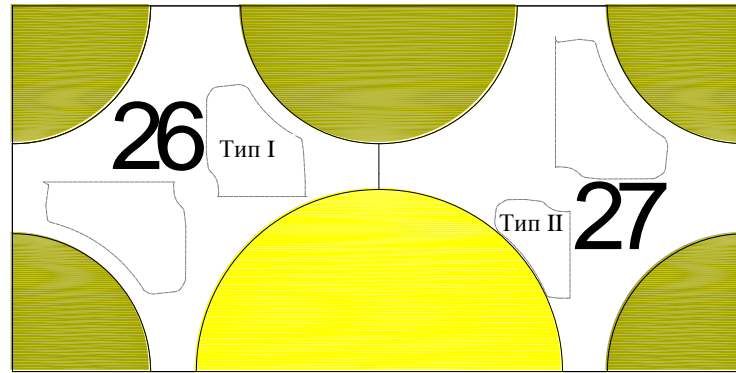


Рис. 10. Особенности конструкции турбулизирующих deflectоров в области НК

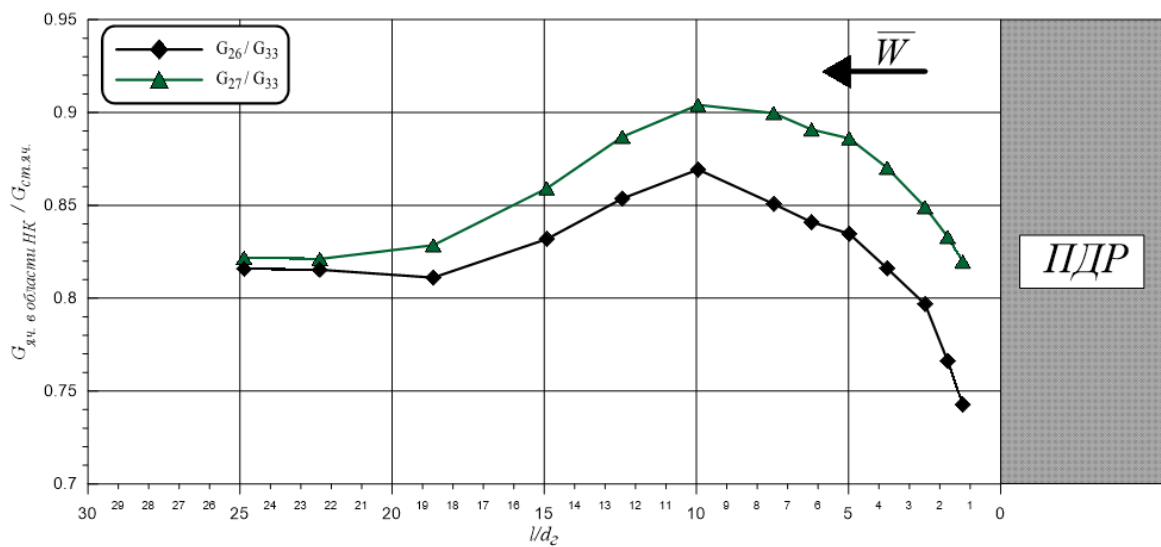


Рис. 11. Отношение расходов теплоносителя через ячейки 26 и 27, прилежащие к НК, к регулярной ячейке 33 при постановке ПДР с дополнительными deflectорами в области НК ($\bar{w} = 33,29$ м/с, $Re=89000$)

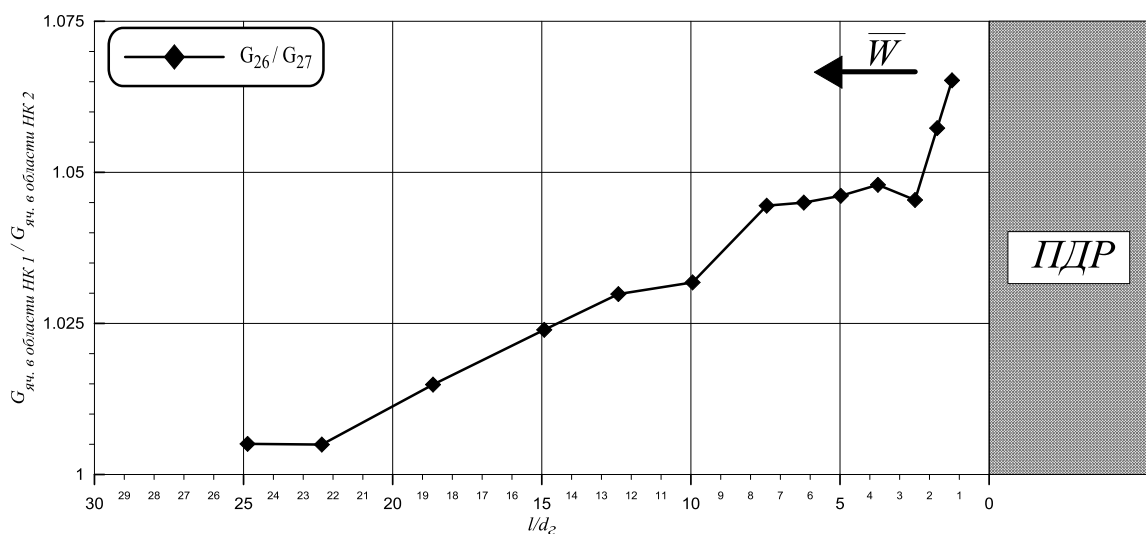


Рис. 12. Распределение расходов теплоносителя через ячейки 26 и 27 области НК ($\bar{w} = 33,29$ м/с, $Re=89000$)

Определив осевую скорость и учитывая площадь проходного сечения ячеек, можно рассчитать расходы теплоносителя через регулярную ячейку и прилежащие к НК ячейки. Анализ полученных данных показал, что расход теплоносителя через ячейки области НК составляет 80% от расхода через регулярную ячейку. Данное расхождение в расходах практически неизменно на расстоянии $\Delta l/d_T = 23$.

Выравнивание расходов теплоносителя через ячейки области НК с различной конструкцией турбулизирующих элементов происходит через $\Delta l/d_T = 25$.

Заключение

Комплексный анализ результатов исследований позволил выявить следующие закономерности формирования потока теплоносителя:

- движение потока за решетками происходит согласно ориентации дефлекторов. Данный факт указывает на то, что основным влиянием на формирование структуры течения потока оказывает направление дефлектора;
- возмущения, вносимые дефлекторами перемешивающей дистанционирующей решетки, носят затухающий характер. Затухание массообменных процессов за решеткой происходит на расстоянии $\Delta l/d_T = 17 \div 20$;
- расход теплоносителя через ячейки области направляющего канала составляет 80% от расхода через стандартную ячейку, перераспределение расхода обусловлено различием в площадях проходного сечения, а также особенностями расположения дефлекторов в области направляющего канала;
- в области направляющего канала выравнивание расходов теплоносителя через ячейки с различной конструкцией турбулизирующих элементов происходит через $\Delta l/d_T = 25$.

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. **Бых, О.А.** Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах / О.А. Бых [и др.]; под ред. С.М. Дмитриева. – М.: Машиностроение. 2013. – 203 с.
2. **Дмитриев, С.М.** Экспериментальное исследование локальной гидродинамики теплоносителя в ТВС – КВАДРАТ реактора PWR при постановке перемешивающих решеток с различными типами дефлекторов / С.М. Дмитриев [и др.] // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2015. №3 С. 63-70.
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.** Исследование локальной гидродинамики и межячейкового массообмена потока теплоносителя в районе направляющих каналов тепловыделяющих сборок реакторов PWR / С.М. Дмитриев [и др.] // Промышленная энергетика. 2013. №12. С. 45–50.
5. **Дмитриев, С.М.** Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР / С.М. Дмитриев [и др.] // Атомная энергия. 2012. Т. 113. № 5. С. 252–257.

Дата поступления
в редакцию 02.02.2016

P.V. Arsenov, A.V. Varentsov, D.V. Doronkov, K.S. Konovalov,
E.N. Polozkova, A.E. Khrobostov

**INVESTIGATION OF LOCAL HYDRODYNAMICS OF THE COOLANT
FLOW BEHIND THE MIXING GRID HAVING «LARGE SCALE» TYPE
OF VANES IN TVS-KVADRAT FUEL ASSEMBLY**

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

Purpose: The main objective of the research was to investigate the characteristics of local hydrodynamics of the coolant flow in TVS-KVADRAT fuel assemblies of PWR reactors.

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.

Findings: The study investigated local hydrodynamics in the nuclear reactor FA. The study revealed the heat carrier flow features in TVS-KVADRAT fuel assemblies of PWR reactors.

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

Originality/value: Topically of this article is in local hydrodynamics of the coolant flow in TVS-KVADRAT fuel assemblies of PWR reactors to physical laws. Therefore, we can prove heat engineering reliability of the PWR reactor active zone with TVS-KVADRAT fuel assemblies.

Key words: nuclear reactor, core, fuel assembly, spacing grid, coolant hydrodynamics.