

УДК 621.039

А.В. Варенцов, Д.В. Доронков, Е.М. Илютина, И.В. Каратушина,  
В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов

## ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТВС-КВАДРАТ РЕАКТОРА PWR ПРИ ПОСТАНОВКЕ ПЕРЕМЕШИВАЮЩИХ ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИХ РЕШЕТОК С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ДЕФЛЕКТОРОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Статья посвящена исследованию влияния перемешивающих дистанционирующих решеток с различными типами дефлекторов на течение теплоносителя в ТВС–Квадрат реактора PWR. Актуальность работы вызвана стремлением повысить конкурентоспособность отечественных тепловыделяющих сборок на мировом рынке для реакторных установок западного дизайна. Кратко описаны стенд и экспериментальная модель, представлены методики проведения исследований и обоснована представительность проводимых экспериментов. Полученные результаты работы используются для верификации трехмерных CFD-программ и в прикладных поячейковых кодах, а также являются базой данных при расчетах теплотехнической надежности активных зон реакторов PWR с ТВС-Квадрат.

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

### Введение

На сегодняшний день потенциал России по созданию ядерного топлива отечественного дизайна составляет 17% мирового рынка топлива. Это 76 энергетических реакторов в России и 14 в других странах мира ( Финляндия, Болгария, Венгрия, Словакия, Чехия, Украина, Армения и Китай). Однако более 80% мирового рынка энергетических реакторов используют конструкцию топлива так называемого квадратного сечения. Поэтому дальнейшее увеличение доли присутствия России на рынке мирового ядерного топлива связано с созданием и экспортом отечественных разработок топлива западного дизайна за рубеж.

Для достижения поставленной цели по заданию топливной компании «ТВЭЛ» АО «ОКБМ Африкантов» была разработана конструкция тепловыделяющей сборки квадратного сечения (ТВС–Квадрат), ориентированная на западный рынок потребителей ядерного топлива. В основе конструкции ТВС–Квадрат специалистами АО «ОКБМ Африкантов» были использованы апробированные решения по каркасу и дистанционирующим решеткам, получившие распространение для ТВС реакторов ВВЭР. Так же в конструкции ТВС-Квадрат предусмотрено наличие перемешивающих дистанционирующих решеток (ПДР) и дополнительно устанавливаемых перемешивающих решеток, которые имеют дефлекторы, выступающие в роли турбулизаторов потока теплоносителя и интенсификаторов теплообмена. Использование подобных элементов направлено на решение ряда вопросов, а именно: снизить неравномерности теплогидравлических характеристик теплоносителя; выровнять температуру (энтальпию) теплоносителя по поперечному сечению сборки; повысить запас до кризиса теплоотдачи. Благодаря этому становится возможным повышение критического теплового потока в активной зоне и, следовательно, увеличение удельной тепловой мощности реактора.

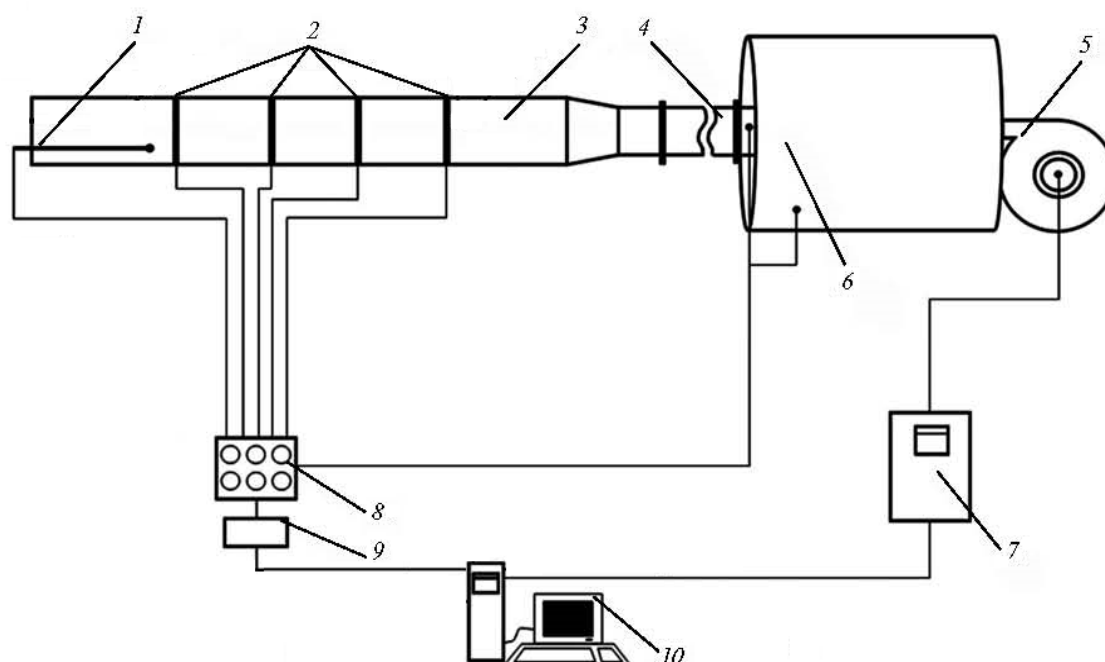
В ТВС–Квадрат реакторов PWR применяются пластинчатые решетки, снабженные дефлекторами типа split vane, позволяющими одновременно создать круговые поперечные течения теплоносителя вокруг ТВЭЛов и закрутку потока в межТВЭльном пространстве. Особое внимание следует уделить профилю дефлекторов и выбору угла отгиба их относительно осевого направления движения теплоносителя, так как эти факторы в значительной степени

влияют на гидравлическое сопротивление сборки. Таким образом, варианты исполнения перемешивающих решеток для ТВС–Квадрат требуют поиска оптимального конструктивного решения, которое благоприятнейшим образом сказывалось на сочетании таких параметров, как интенсивность перемешивания, гидравлические потери и запасы до кризиса теплоотдачи.

Оценка влияния перемешивающих устройств на критические потоки тепла возможна только на теплофизических стендах при натуральных условиях течения теплоносителя, а изучение гидродинамики сборок ТВЭЛов и активных зон реакторов целесообразно проводить на масштабных и полноразмерных моделях кассет на аэро- и гидродинамических стендах [1, 2]. Поэтому экспериментальное исследование закономерностей формирования локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя в пучках ТВЭЛов ТВС–Квадрат при использовании перемешивающих дистанционирующих решеток является актуальной задачей, решение которой позволяет обосновать теплотехническую надежность активных зон реакторов PWR.

### Описание экспериментального стенда

Для определения влияния перемешивающих дистанционирующих решеток на поток теплоносителя в ТВС–Квадрат на базе НГТУ им. Р.Е. Алексеева был создан экспериментальный стенд [3, 4]. Он представляет собой аэродинамический разомкнутый контур, через который прокачивается воздух (рис. 1). Организация течения теплоносителя следующая: воздух посредством радиального вентилятора высокого давления 5 нагнетается в ресиверную емкость 6 и далее, пройдя расходомерный коллектор 4 и экспериментальную модель 3, выбрасывается в атмосферу. Для измерения перепадов давлений по длине ЭМ 2, а так же вектора скорости за дефлекторами ПДР разработан измерительный комплекс, в состав которого входит: пятиканальный пневмометрический зонд 1; блок аналоговых преобразователей давления 8; координатное устройство; базовый блок коммутации/измерения Agilent 34980A 9; ПЭВМ с соответствующим программным обеспечением 10.



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

- 1 – пятиканальный пневмометрический зонд; 2 – статические отборы;  
3 – экспериментальная модель; 4 – участок стабилизации потока; 5 – вентилятор высокого давления;  
6 – ресиверная емкость; 7 – преобразователь частоты; 8 – датчики давления; 9 – базовый блок коммутации/измерения Agilent 34980A; 10 – ЭВМ

Экспериментальная модель, входящая в состав стенда, представляет собой масштабный фрагмент ТВС-Квадрат реактора типа PWR, выполненный в полном геометрическом подобии натурной ТВС [5]. Коэффициентом геометрического подобия  $K_T = 4,2$ . ЭМ состоит из сорока пяти цилиндрических ТВЭЛ-имитаторов, четырех имитаторов направляющего канала, поясов перемешивающих и дистанционирующих решеток.

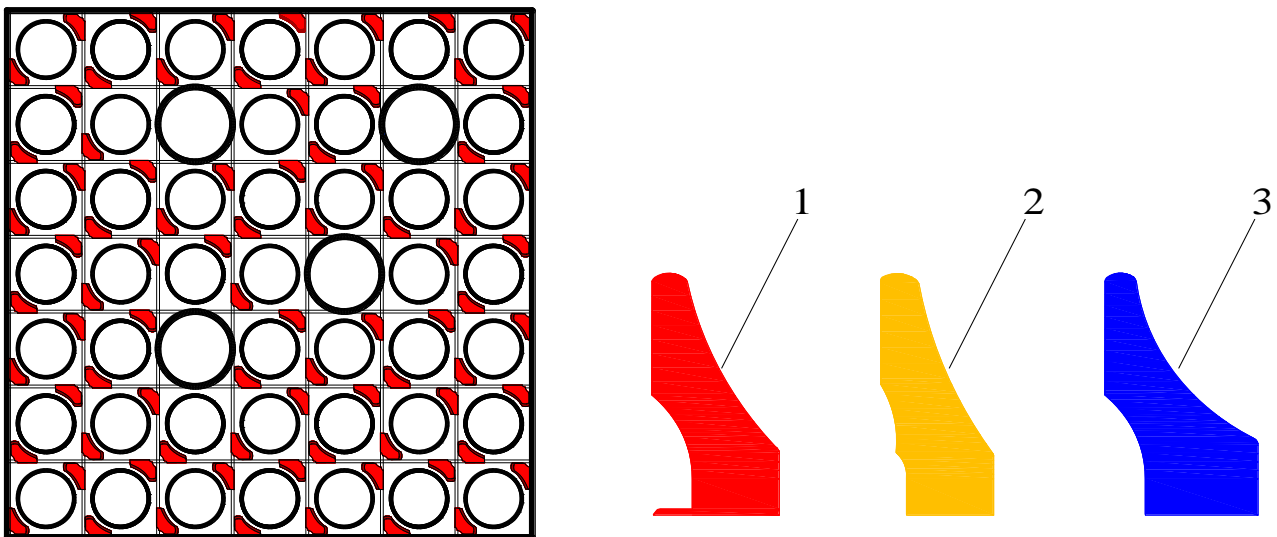
Исследуемые пояса ПДР представляют собой пластинчатые решетки, состоящие из взаимно перпендикулярных рядов пластин и восьмигранных ячеек, выполняющих функцию дистанционирования ТВЭЛ-имитаторов. К верхним кромкам пластин в местах их пересечения приваривались дефлекторы различного конструктивного исполнения.

В работе рассматривались три варианта дефлекторов типа split vane:

1) первоначальный вариант дефлектора высотой 9 мм, углом отгиба  $25^\circ$  и параллельной линиейгиба относительно верхней кромки пластины (9/25) (рис. 2, 1);

2) усовершенствованный дефлектор 9/25 увеличенной площадью на 8% по отношению к первоначальному варианту и профилем, повернутым к центру ячейки согласно линиигиба в  $15^\circ$  относительно верхней кромки пластины (9/25/8/15) (рис. 2, 2);

3) усовершенствованный дефлектор 9/25 увеличенной площадью на 21% по отношению к первоначальному варианту и профилем, повернутым к ТВЭЛу согласно линиигиба в  $15^\circ$  относительно верхней кромки пластины (9/25/21/15) (рис. 2, 3).



**Рис. 2. Перемешивающая дистанционирующая решетка фрагмента ТВС – Квадрат:**  
тип дефлектора: 1 – прямой гиб; 2 – косой гиб; 3 – обратный гиб

### Измерительный комплекс

Для измерения вектора скорости, а также давления в пространственном потоке использовался пятиканальный пневмометрический зонд с конической чувствительной частью, имеющий пять приемных отверстий [6, 7]. Относительная погрешность измерения проекций вектора скорости  $W_x$ ,  $W_y$ ,  $W_z$  с учетом предварительной тарировки в аэродинамической трубе с заранее известной среднерасходной скоростью, соответствующей скорости на входе в ЭМ, составила 2, 2, 2,5% соответственно.

Снятие показаний с пятиканального пневмометрического зонда осуществлялось с помощью блока аналоговых преобразователей давления, представляющего собой набор преобразователей избыточного давления и разности давлений. Предел допускаемой основной погрешности составляет  $\pm 0,25\%$ .

### Обоснование представительности проводимых исследований

Важным этапом любых исследований является подтверждение их 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 экспериментальной модели моделируется воздухом на основе теории гидродинамического подобия, включающем в себя кинематическое и геометрическое подобие, то в области автомодельности профиль относительной скорости ( $W_{лок}/W_{ср.расх}$ ) остается неизменным [8]. Следовательно, исследования в зоне автомодельности позволят перенести результаты эксперимента на натурные условия течения теплоносителя в штатных ТВС-Квадрат. Соответственно для обоснования представительности исследований были проведены эксперименты по определению участков гидродинамической стабилизации потока [5] и границ зон автомодельного течения.

Начало зоны автомодельного течения воздуха в ЭМ было определено на основе результатов измерения гидравлического сопротивления поясов ПДР с различными типами дефлекторов. На рис. 3 приведена иллюстрация массива точек коэффициента гидравлического сопротивления ПДР ЭМ в зависимости от числа Re. Из рис. 3 видно, что переходная область турбулентного течения наблюдается при числах Re до  $7 \cdot 10^4$ , при числах Re свыше  $7 \cdot 10^4$  наступает область автомодельного течения теплоносителя. Необходимость данных исследований вызвана тем, что для обоснования представительности проводимых исследований необходимо равенство коэффициента гидравлического сопротивления (КГС) ПДР ЭМ и ПДР натуральных ТВС-Квадрат.

Анализ результатов исследования коэффициентов гидравлического сопротивления показал, что КГС перемешивающих дистанционирующих решеток ЭМ в области автомодельного течения соответствуют гидравлическому сопротивлению натуральных перемешивающих дистанционирующих решеток ТВС-Квадрат реактора PWR. Кроме того, методики экспериментальных исследований были апробированы для подтверждения достоверности результатов, определена погрешность измеряемых величин. Погрешности аксиальной составляющей скорости, вычисленные сравнением расходов воздуха на входе в модель и по ячейкам, не превышала 5%.

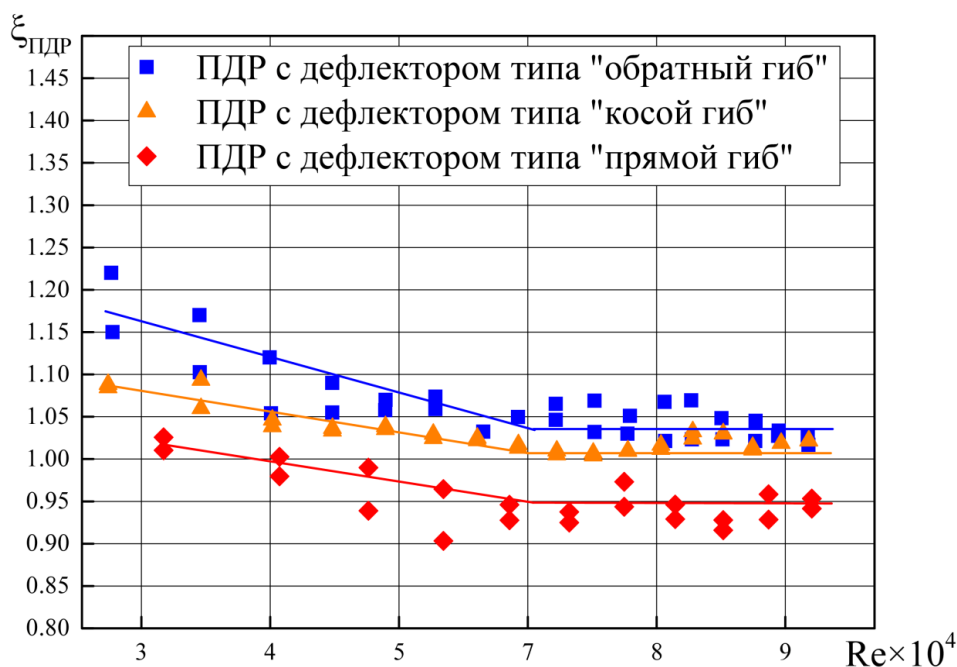


Рис. 3. Зависимость коэффициента местного гидравлического сопротивления поясов перемешивающих дистанционирующих решеток ЭМ от числа Re

### Методика проведения экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя в ЭМ за перемешивающей решеткой заключались в измерении модуля и направления вектора скорости, статического и полного давлений в исследуемой точке пучка стержней. Поэтому условно поперечное сечение ЭМ было разбито на ячейки, каждой из которых был присвоен свой порядковый номер. В качестве характерной ячейки для определения влияния различных типов дефлекторов ПДР на поток теплоносителя была выбрана регулярная ячейка. Контур и границы регулярной ячейки представлен на рис. 4. Для получения полной пространственной картины течения теплоносителя за дефлекторами ПДР регулярная ячейка была разделена на зоны измерения, в каждой из которых вектор скорости измерялся в 15-ти сечениях по длине модели (рис. 4).

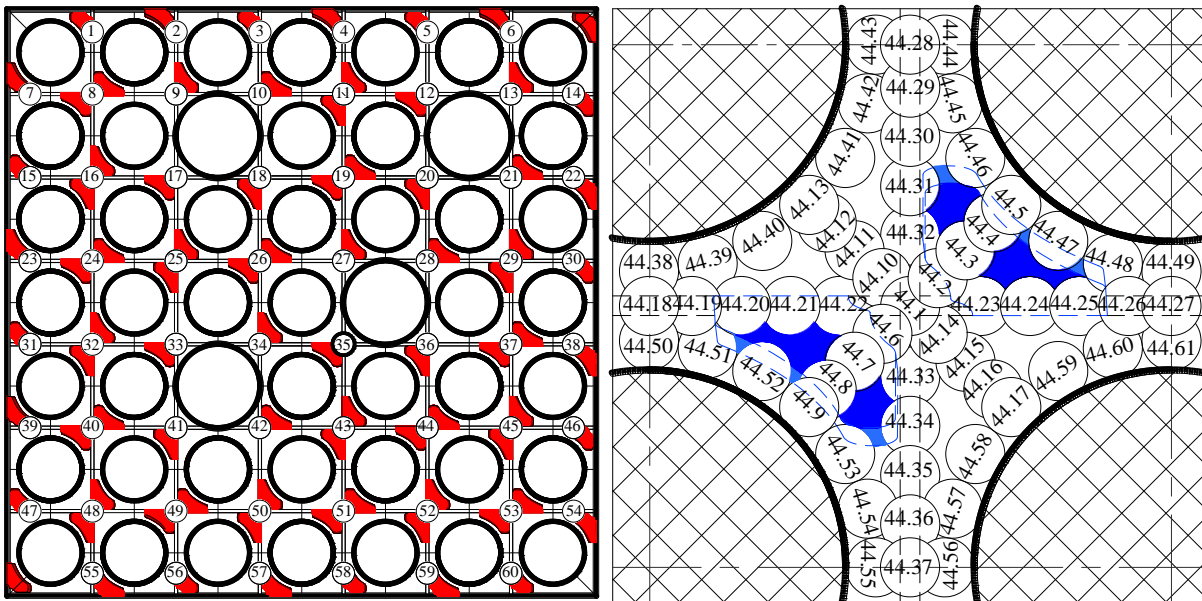


Рис. 4. Расположение зон измерений гидродинамических характеристик в поперечном сечении модели ЭМ

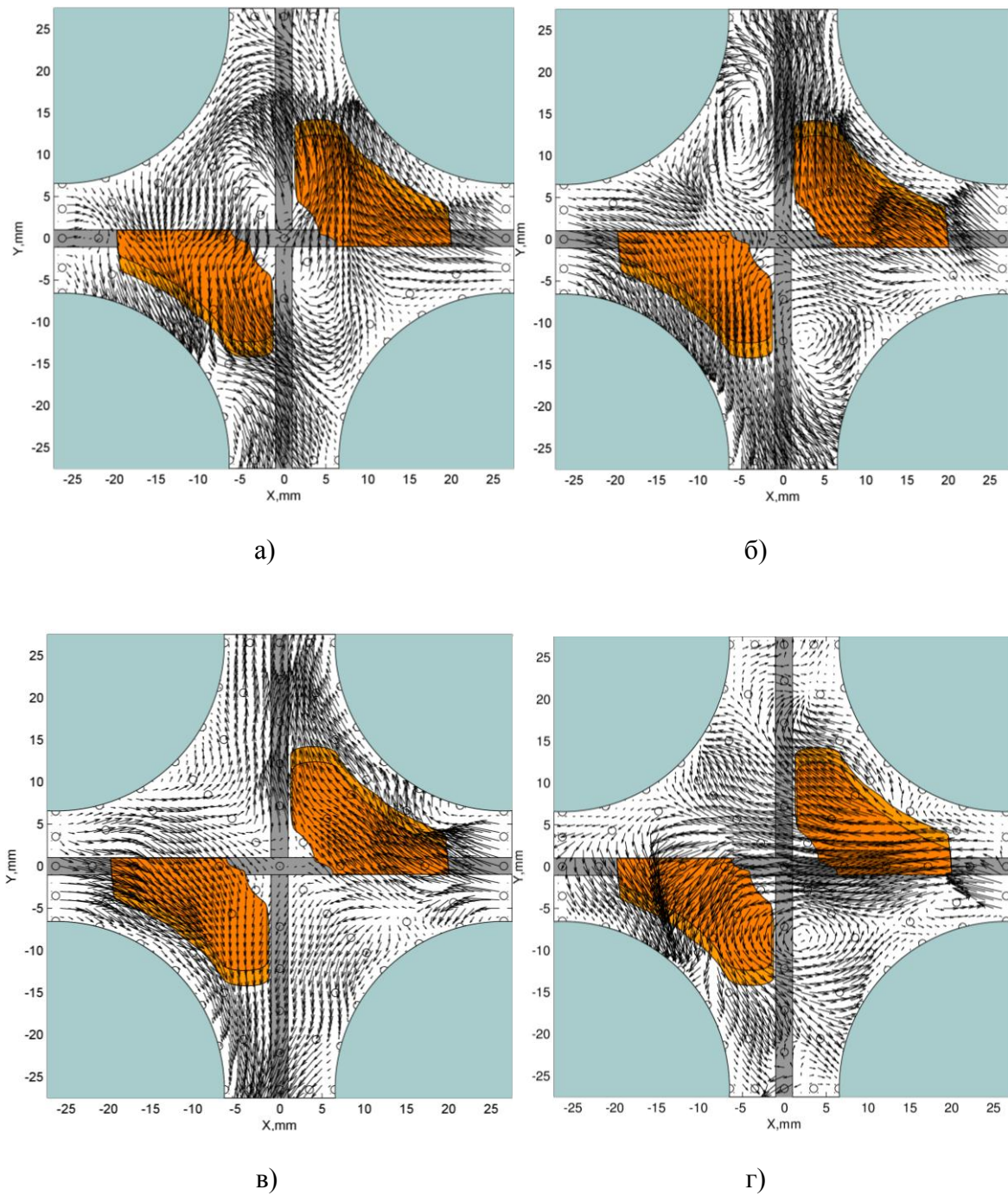
### Результаты исследований

На основе результатов измерения вектора скорости за ПДР в стандартной ячейке (рис. 5 – рис. 7) ТВС–Квадрат сделаны следующие выводы:

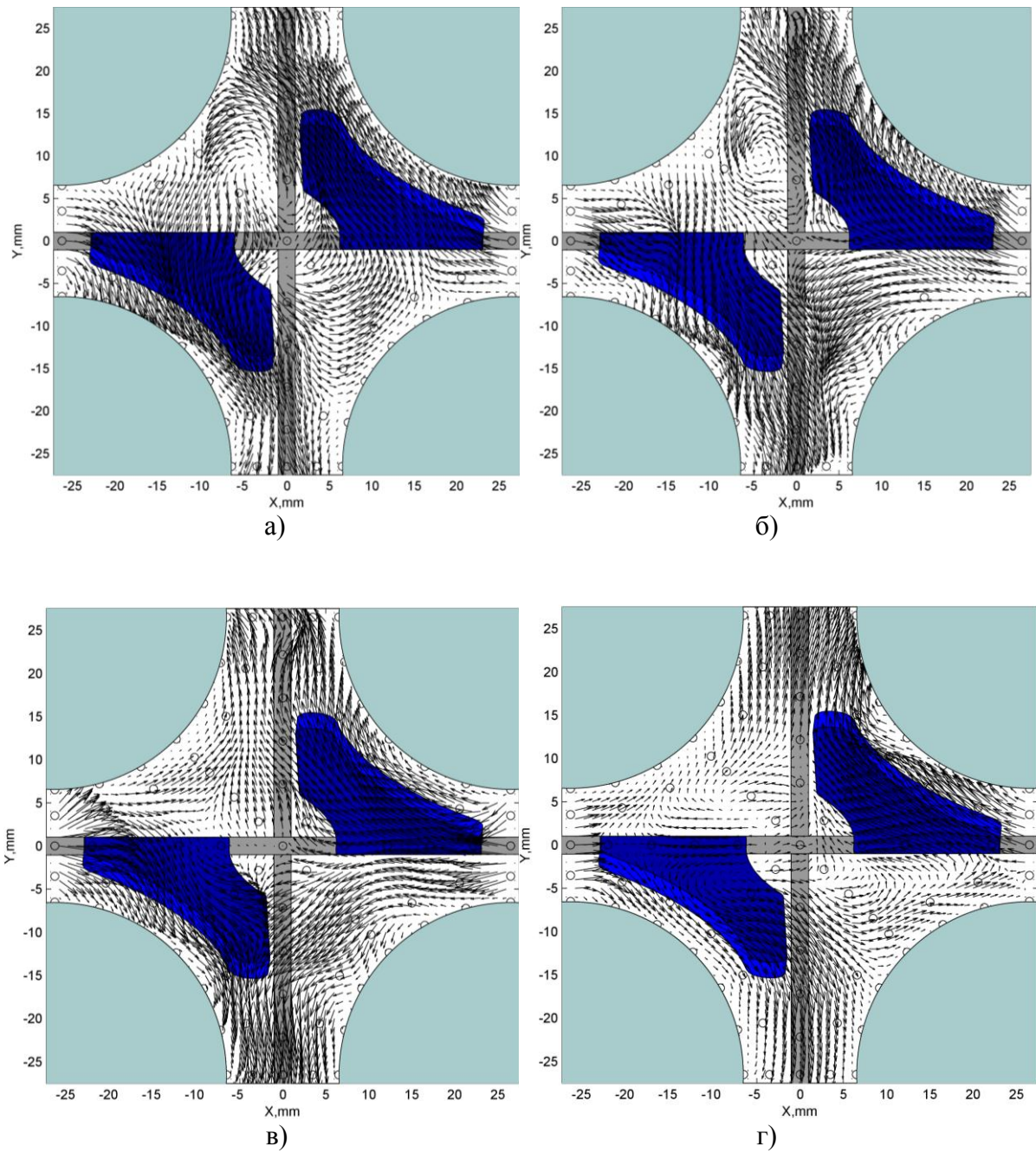
1. За любым из исследуемых типов дефлекторов образуется вихревое течение, которое прекращается на расстоянии  $\Delta l/d_r=3-5$  за дефлекторами типа «косой гиб» и «обратный гиб» и на расстоянии  $\Delta l/d_r=10-12$  за дефлекторами типа «прямой гиб».

2. Затухание поперечных скоростей за ПДР с дефлекторами типа «косой гиб» и «прямой гиб» происходит на расстоянии  $\Delta l/d_r=14\div 15$ , а за ПДР с дефлекторами типа «обратный гиб» на расстоянии  $\Delta l/d_r=24$ .

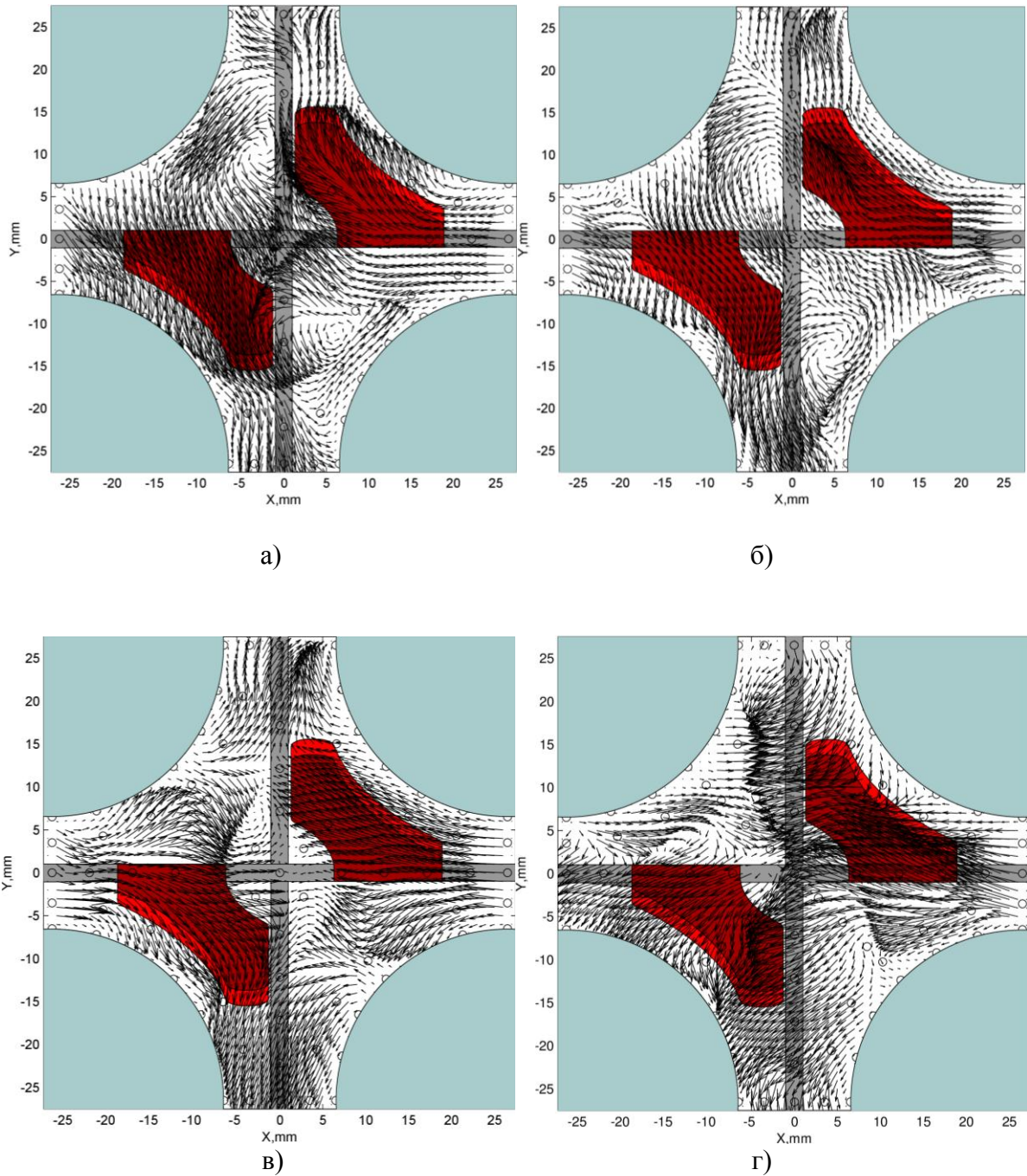
Ввиду этого экспериментальные исследования локальной гидродинамики теплоносителя за перемешивающими дистанционирующими решетками ТВС-Квадрат с дефлекторами типа «прямой гиб», «косой гиб» и «обратный гиб» показали, что на интенсивность межъячейкового обмена, помимо угла отгиба, влияет площадь профиля дефлектора, которая перекрывает проходное сечение ячеек ТВС, а на структуру и форму вихря в центре ячейки ключевое влияние оказывает линиягиба дефлектора.



**Рис. 5. Векторные поля за ПДР с дефлекторами типа «косой гиб» в стандартной ячейке:**  
*a* –  $\Delta L/D_x=1,3$ ; *б* –  $\Delta L/D_x=2,6$ ; *в* –  $\Delta L/D_x=5,2$ ; *г* –  $\Delta L/D_x=14,0$  ( $\bar{W} = 41,46$  м/с,  $Re = 105100$ )



**Рис. 6. Векторные поля за ПДР с дефлекторами типа «обратный гиб» в стандартной ячейке:**  
*a* –  $\Delta L/D_x=1,3$ ; *б* –  $\Delta L/D_x=2,6$ ; *в* –  $\Delta L/D_x=5,2$ ; *г* –  $\Delta L/D_x=23,6$  ( $\bar{W} = 37,74$  м/с,  $Re = 95670$ )



**Рис. 7. Векторные поля за ПДР с дефлекторами типа «прямой гиб» в стандартной ячейке:**

$a - \Delta L/D_x=1,3$ ;  $б - \Delta L/D_x=2,6$ ;  $в - \Delta L/D_x=5,2$ ;  $г - \Delta L/D_x=14,0$  ( $\bar{W} = 37,90$  м/с,  $Re = 96080$ )

### Выводы

1. Проведены комплексные исследования, определены локальные гидродинамические характеристики потока теплоносителя за перемешивающими дистанционирующими решетками ТВС–Квадрат реактора PWR. По результатам исследований были выявлены следующие закономерности течения теплоносителя в ТВС–Квадрат:

- перемешивающая дистанционирующая решетка вносит возмущения в поток теплоносителя. При этом возмущения в основном генерируются дефлекторами решетки, которые создают конвективные турбулентные течения. Интенсивность и направленность конвективных течений определяются профилем и ориентацией



дефлекторов относительно осевого направления движения теплоносителя. Наличие турбулентного трения приводит к диссипации энергии движения потока, что быстро уменьшает интенсивность поперечных конвективных течений, создаваемых дефлекторами решетки, но при этом сама исследуемая решетка создает достаточно высокую интенсивность перемешивания;

- за любым из исследуемых типов дефлекторов образуется вихревое течение, которое прекращается на расстоянии  $\Delta l/d_T = 3 - 5$  за дефлекторами типа «косой гиб» и «обратный гиб», и на расстоянии  $\Delta l/d_T = 10 - 12$  за дефлекторами типа «прямой гиб»;
- затухание поперечных скоростей за ПДР с дефлекторами типа «косой гиб» и «прямой гиб» происходит на расстоянии  $\Delta l/d_T = 14 - 15$ , а за ПДР с дефлекторами типа «обратный гиб» на расстоянии  $\Delta l/d_T \approx 24$ .

2. Экспериментально определен в области автомодельного течения коэффициент гидравлического сопротивления поясов перемешивающих дистанционирующих решеток ТВС–Квадрат с различными типами дефлекторов:

- КГС ПДР с дефлекторами типа «прямой гиб» – 0,95;
- КГС ПДР с дефлекторами типа «косой гиб» – 1,01;
- КГС ПДР с дефлекторами типа «обратный гиб» – 1,04.

3. Экспериментальные исследования локальной гидродинамики теплоносителя за перемешивающими дистанционирующими решетками ТВС–Квадрат с дефлекторами типа «прямой гиб», «косой гиб» и «обратный гиб» показали, что на интенсивность межъячейкового обмена, помимо угла отгиба, влияет площадь профиля дефлектора, которая перекрывает проходное сечение ячеек ТВС, а на структуру и форму вихря в центре ячейки ключевое влияние оказывает линиягиба дефлектора. При этом следует отметить, что наибольшая длина затухания гидродинамических характеристик отмечается за дефлекторами типа «обратный гиб».

Полученные результаты работы используются для верификации трехмерных CFD-программ и в прикладных ячейковых кодах, а также являются базой данных при расчетах теплотехнической надежности активных зон реакторов PWR с ТВС–Квадрат.

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 2010г. № 218)

#### Библиографический список

1. **Балыбердин, А.С.** Особенности гидродинамики и массообмена теплоносителя в ТВСА–АЛЬФА реактора ВВЭР / А.С. Балыбердин [и др.] // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2010. № 1. С. 42–48.
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. № 5. С. 252–256.
3. **Варенцов, А.В.** Экспериментальные исследования локального массообмена и эффективности перемешивания теплоносителя дистанционирующими решетками в ТВС реактора КЛТ-40С / А.В. Варенцов [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012. № 1 (94). С. 107–113.
4. **Дмитриев, С.М.** Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в тепловыделяющих сборках реакторов типа PWR. / С.М. Дмитриев [и др.] // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4-3. С. 751–753.
5. **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.
6. **Бородин, С.С.** Расчетно-экспериментальные исследования локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА реакторов ВВЭР с перемешивающими

- вающими решетками / С.С. Бородин [и др.] // Тепловые процессы в технике. 2015. № 4. С. 177–182.
7. **Дмитриев, С.М.** Экспериментальные исследования поля скорости потока теплоносителя в ТВСА реакторов ВВЭР и ВБЭР / С.М. Дмитриев [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. № 1 (102). С. 113–118.
  8. **Гухман, А.А.** Введение в теорию подобия / А.А. Гухман. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Высш. шк., 1973.

*Дата поступления  
в редакцию 25.06.2015*

**A. V. Varentsov, E. M. Plutina, I. V. Caratushina,  
D.V. Doronkov, V.D. Sorokin, A.E. Khrobostov**

## **FEATURES OF THE FLOW INSIDE TVS-KVADRAT PWR REACTOR WITH STAGED MIXING SPACER DECI-CURRENT WITH VARIOUS TYPES OF BAFFLES**

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

**Subject, theme, aim of study:**The article is dedicated to research of local hydrodynamics of coolant in FA Kvadrat-type of PWR at fitted spacer mixing grids with different type of deflectors.

**Method and methodology study performance:**Experimental researches of local hydrodynamic characteristics of coolant flow in EM (experimental model) behind mixing grid consisted in measurement of velocity vector module, total pressure and static pressure by means of fivechannel pneumatic probe into a bunch of fuel rods of EM.

**Results and their application field:**The obtained experimental information has been generalized. And a data bank for verifying CDF codes and computer programs for cell-wise calculations of the PWR reactor core containing Kvadrat FAs aimed at estimating the reactor core thermal reliability has been established.

**Conclusions:**Based on the researches findings constructions of type of deflectors under investigation have been analysed and main factors of influence different deflectors of mixing grid on coolant flow in FA Kvadrat-type of PWR have been elicited.

*Key words:* nuclear reactor, a fuel Assembly, fluid flow heat carrier, mixing spacer grid.