

УДК 621.039

**П.В. Арсенов, А.А. Добров, Д.В. Доронков, Е.Н. Полозкова,
В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов**

ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ТЕЧЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ЗА ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕЙ РЕШЕТКОЙ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ДЕФЛЕКТОРОВ В ОБЛАСТИ НАПРАВЛЯЮЩЕГО КАНАЛА ТВС-КВАДРАТ

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 обусловлена необходимостью всестороннего исследования закономерностей течения потока теплоносителя в тепловыделяющих сборках западного дизайна, разработанных отечественными компаниями. В статье кратко описаны стенд и экспериментальная модель, представлены методики проведения исследований, обоснование представительности испытаний и их результаты. Полученные результаты используются для обоснования теплотехнической надежности активных зон реакторов PWR с ТВС–Квадрат и верификации трехмерных CFD-программ и в прикладных пояснительных документах.

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

Введение

Тепловыделяющие сборки для активных зон энергетических реакторов доступны на мировом рынке в двух основных конструктивных исполнениях: кассеты квадратного сечения для американских и европейских установок и шестигранные – для российских. Ядерное топливо отечественного дизайна способно охватить около 17% глобального рынка. Поэтому дальнейшее увеличение доли присутствия российских компаний на рынке мирового ядерного топлива связано с созданием и экспортом отечественных разработок топлива западного дизайна за рубеж.

Для осуществления данной программы АО «ОКБМ Африкантов» был разработан продукт, ориентированный на западный рынок – тепловыделяющая сборка квадратного сечения (ТВС–Квадрат).

В основе конструкции ТВС–Квадрат использованы решения по каркасу и дистанционирующим решеткам (ДР), показавшие свою надежность для реакторов ВВЭР. Также в конструкции предусмотрено наличие пластинчатых перемешивающих дистанционирующих решеток (ПДР) и дополнительно устанавливаемых перемешивающих решеток (ПР). Решетки снабжаются дефлекторами типа «split vane», позволяющими одновременно создавать круговые поперечные течения теплоносителя вокруг ТВЭЛов и закрутку потока в межТВЭЛном пространстве. Это позволяет снизить неравномерности теплогидравлических характеристик теплоносителя, выровнять температуру теплоносителя по поперечному сечению сборки, а также повысить запас до кризиса теплоотдачи. Таким образом, становится возможным увеличить удельную тепловую мощность реактора путем повышения критического теплового потока.

Однако наличие турбулизирующих элементов может привести к нежелательному повышению гидравлического сопротивления самой сборки, поэтому особое внимание следует уделить профилю дефлекторов и выбору угла их отгиба относительно осевого направления движения теплоносителя, так как эти факторы в значительной степени влияют на гидравлическое сопротивление сборки. Таким образом, создание оптимальной конструкции решетки требует поиска решения, обеспечивающего наиболее удачное сочетание таких параметров, как интенсивность перемешивания, гидравлические потери и запасы до кризиса теплоотдачи.

Исследования проводились в области направляющего канала (НК), отличающейся от стандартных ячеек геометрическими характеристиками, параметрами теплового потока, и, как следствие, закономерностями течения теплоносителя.

Обоснование теплотехнической надежности активных зон реакторов PWR с ТВС-Квадрат является обязательным условием успешного внедрения нового продукта на весьма консервативном рынке ядерного топлива. Поэтому экспериментальное исследование формирования локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя в пучках твэлов ТВС-Квадрат является актуальной задачей.

Описание экспериментального стенда

Исследования проводились на экспериментальном стенде, представляющем собой аэродинамический разомкнутый контур.

Экспериментальная модель, входящая в состав стенда, представляет собой фрагмент ТВС-Квадрат реактора типа PWR и выполняется в полном геометрическом подобии натурной ТВС [5]. Модель состоит из твэл-имитаторов, имитаторов направляющих каналов, поясов перемешивающих и дистанционирующих решеток, снабженных дефлекторами. В работе рассматривались три варианта дефлекторов типа «split vane»:

1) первоначальный вариант дефлектора выполнен высотой 9 мм, углом отгиба 25° и параллельной линиейгиба относительно верхней кромки пластины (9/25) (рис. 1, а);

2) усовершенствованный дефлектор 9/25 увеличенной площадью на 8% по отношению к первоначальному варианту и профилем, повернутым к центру ячейки согласно линиигиба в 15° относительно верхней кромки пластины (9/25/8/15) (рис. 1, б);

3) усовершенствованный дефлектор 9/25 увеличенной площадью на 21% по отношению к первоначальному варианту и профилем, повернутым к твэлу согласно линиигиба в 15° относительно верхней кромки пластины (9/25/21/15) (рис. 1, в).

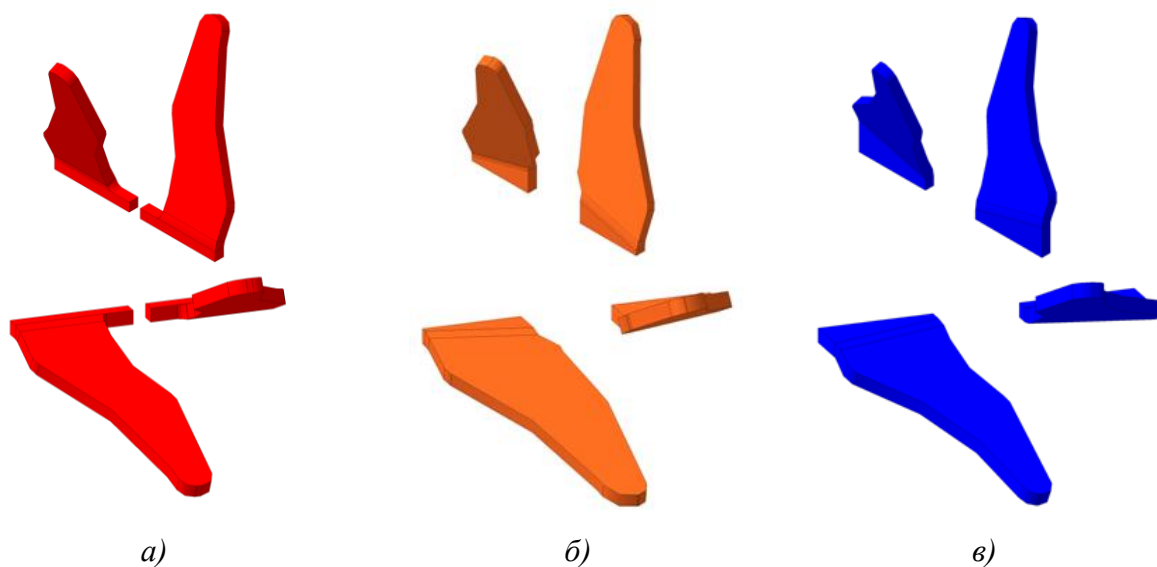


Рис. 1. ПДР ЭМ с различными типами дефлекторов:

- а – ПДР с дефлектором типа «прямой гиб»;
- б – ПДР с дефлектором типа «обратный гиб»;
- в – ПДР с дефлектором типа «обратный гиб»

Измерительный комплекс

Для измерения вектора скорости за дефлекторами ПДР используется измерительный комплекс, в состав которого входят: пятиканальный пневмометрический зонд, блок аналоговых преобразователей давления, координатное устройство; базовый блок коммутации/измерения, ПЭВМ с соответствующим программным обеспечением.

Измерение вектора скорости потока теплоносителя осуществлялось пятиканальным пневмометрическим зондом. Предельные отклонения проекций абсолютной скорости на оси X , Y , Z не превышают 7,5% от абсолютной скорости. Снятие показаний с зонда осуществлялось с помощью блока аналоговых преобразователей давления, представляющего собой набор преобразователей избыточного давления и разности давлений.

Обоснование представительности проводимых исследований

Важным этапом любых исследований является подтверждение их представительности. Проведение исследований течения теплоносителя для штатных ТВС в лабораторных условиях крайне сложно осуществить, так как в активной зоне реактора PWR число Рейнольдса достигает $4,5 \cdot 10^5$. Однако можно моделировать течения воды высокого давления воздухом на основе теории гидродинамического подобия. Согласно данной теории, форма безразмерных полей скорости ($W_{\text{лок}}/W_{\text{ср.расх}}$) остается неизменной на протяжении всей зоны автомодельности [8]. Следовательно, результаты, полученные при числах Re меньше штатных и на воздухе в области автомодельности, могут быть перенесены на реальные условия течения теплоносителя в штатных ТВС.

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. 2 показан массив точек коэффициента гидравлического сопротивления ПДР ЭМ в зависимости от числа Re . Из рисунка видно, что переходная область турбулентного течения наблюдается при числах Re до $7 \cdot 10^4$. При числах Re свыше $7 \cdot 10^4$ начинается автомодельное течение теплоносителя.

Также необходимым условием обоснования представительности испытаний является равенство коэффициента гидравлического сопротивления (КГС) ПДР ЭМ и ПДР натуральных ТВС–Квадрат. Анализ результатов показал, что КГС перемешивающих дистанционирующих решеток ЭМ в области автомодельного течения соответствует гидравлическому сопротивлению натуральных перемешивающих дистанционирующих решеток ТВС–Квадрат реактора PWR.

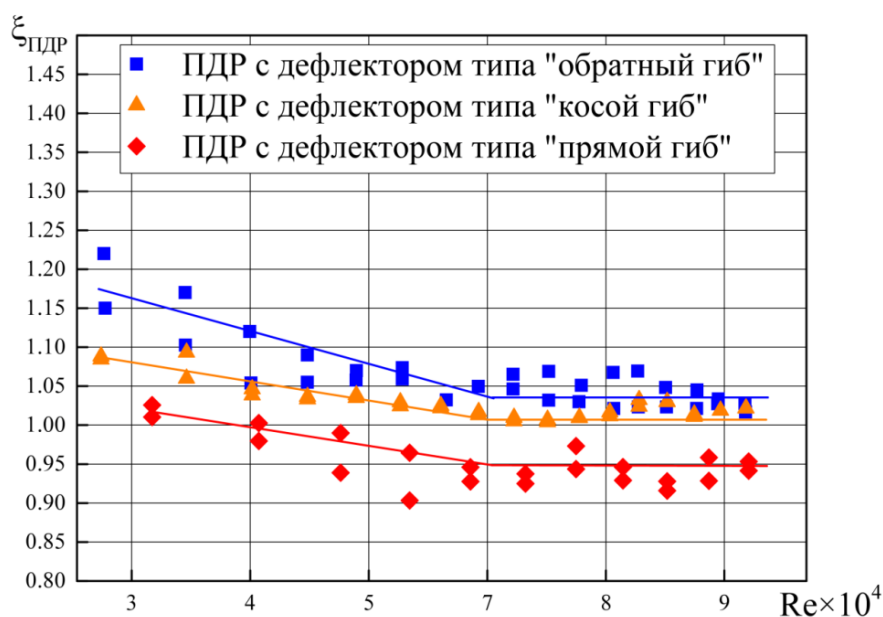


Рис. 2. Зависимость коэффициента местного гидравлического сопротивления поясов перемешивающих дистанционирующих решеток с различными дефлекторами

Методика проведения экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя за перемешивающей дистанционирующей решеткой заключались в измерении модуля и направления вектора скорости в исследуемой точке пучка стержней модели. В качестве характерных ячеек для определения влияния различных типов дефлекторов ПДР на течение потока теплоносителя в области направляющего канала были выбраны ячейки № 27, 28. Для получения полной пространственной картины течения теплоносителя за дефлекторами ПДР ячейки были разделены на зоны измерения, в каждой из которых вектор скорости измерялся в 15 сечениях по длине модели.

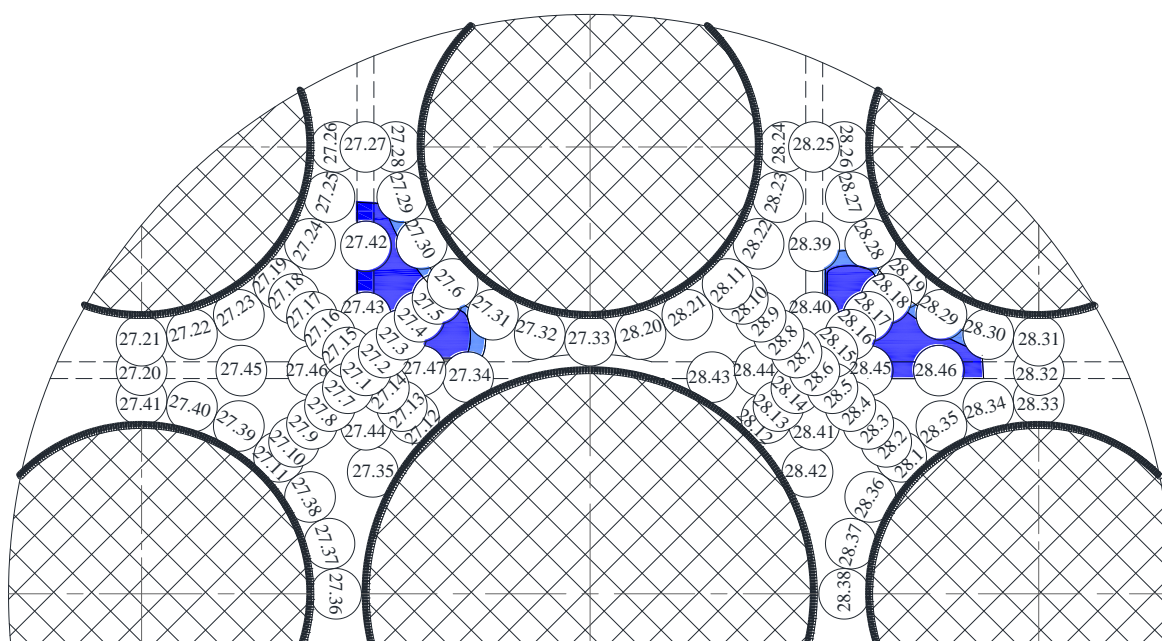


Рис. 3. Расположение зон измерений гидродинамических характеристик в поперечном сечении ЭМ

Результаты исследований

На основе результатов измерения вектора скорости за ПДР в области НК ТВС–Квадрат сделаны следующие выводы:

1. По векторным полям, представленным на рис. 4–9 видно, что в ячейках, где дефлекторы направляют теплоноситель в аналогичные ячейки области НК, за всеми из исследуемых типов дефлекторов, в части, прилежащей непосредственно к направляющему каналу, образуется вихрь, который затухает на расстоянии $\Delta l/d_T \approx 3$ от ПДР.

2. В ячейках НК, где дефлекторы направляют поток в стандартные ячейки, за ПДР с дефлекторами типа «косой гиб» и «прямой гиб» возникает вихрь с длиной затухания $\Delta l/d_T \approx 5-8$ от решетки, омывающий поперечным потоком два прилежащих твэла. При постановке решетки с дефлекторами типа «обратный гиб», вихрь в этой же области затухает на расстоянии $\Delta l/d_T \approx 14$ за ПДР.

3. Длина затухания возмущений, вызванных ПДР в ячейках, прилежащих к НК, с дефлекторами типа «прямой гиб», «косой гиб» и «обратный гиб» заканчивается на расстоянии $\Delta l/d_T \approx 10-14$.

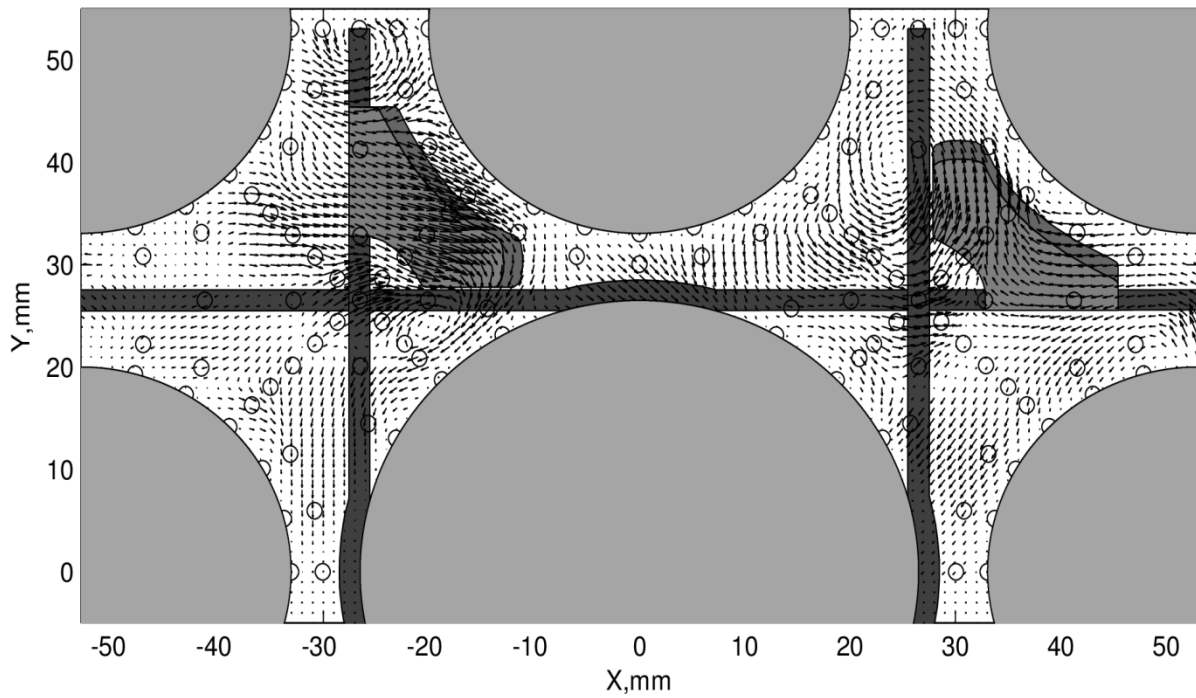


Рис. 4. Векторное поле в области НК при постановке ПДР с дефлекторами типа «прямой гиб» при $l/d_1=27,52$ ($\bar{W} = 37,90$ м/с, $Re = 96000$)

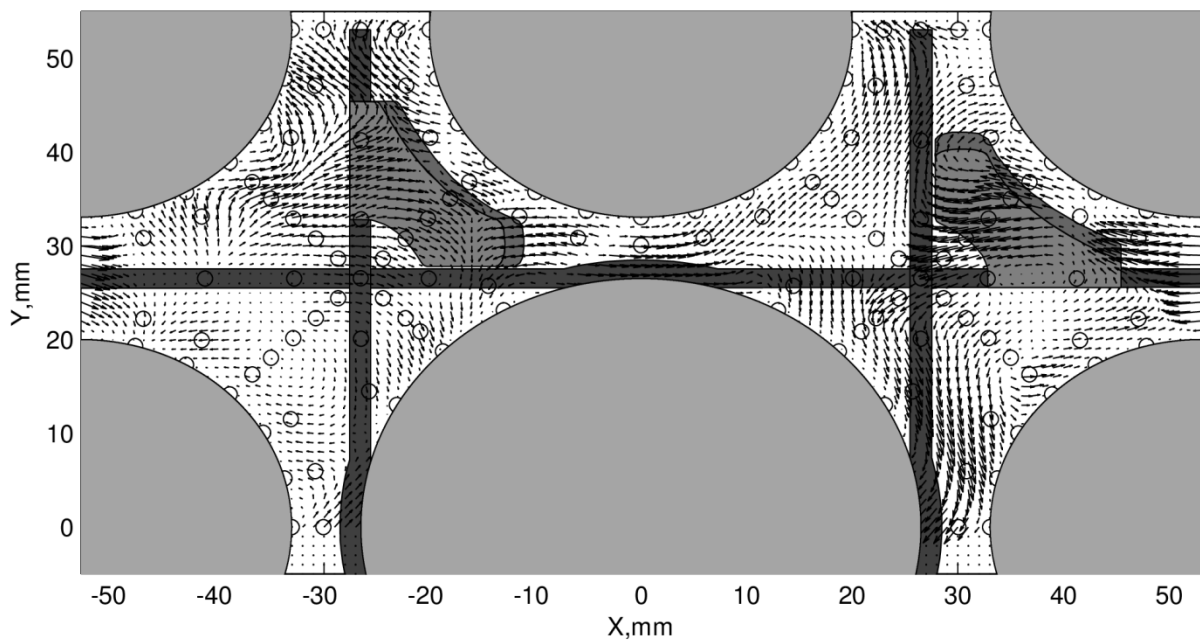


Рис. 5. Векторное поле в области НК при постановке ПДР с дефлекторами типа «прямой гиб» при $l/d_1=5,24$ ($\bar{W} = 37,90$ м/с, $Re = 96000$)

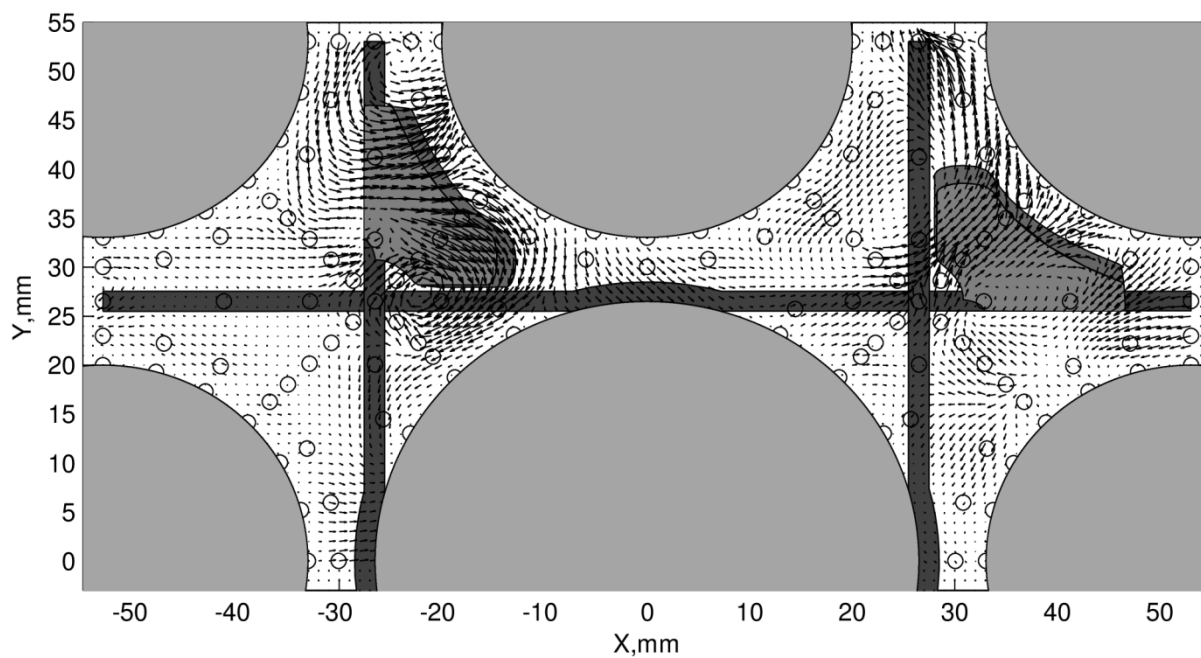


Рис. 6. Векторное поле в области НК при постановке ПДР с дефлекторами типа «косой гиб» при $l/d_z=27,52$ ($\bar{W} = 41,50$ м/с, $Re = 105000$)

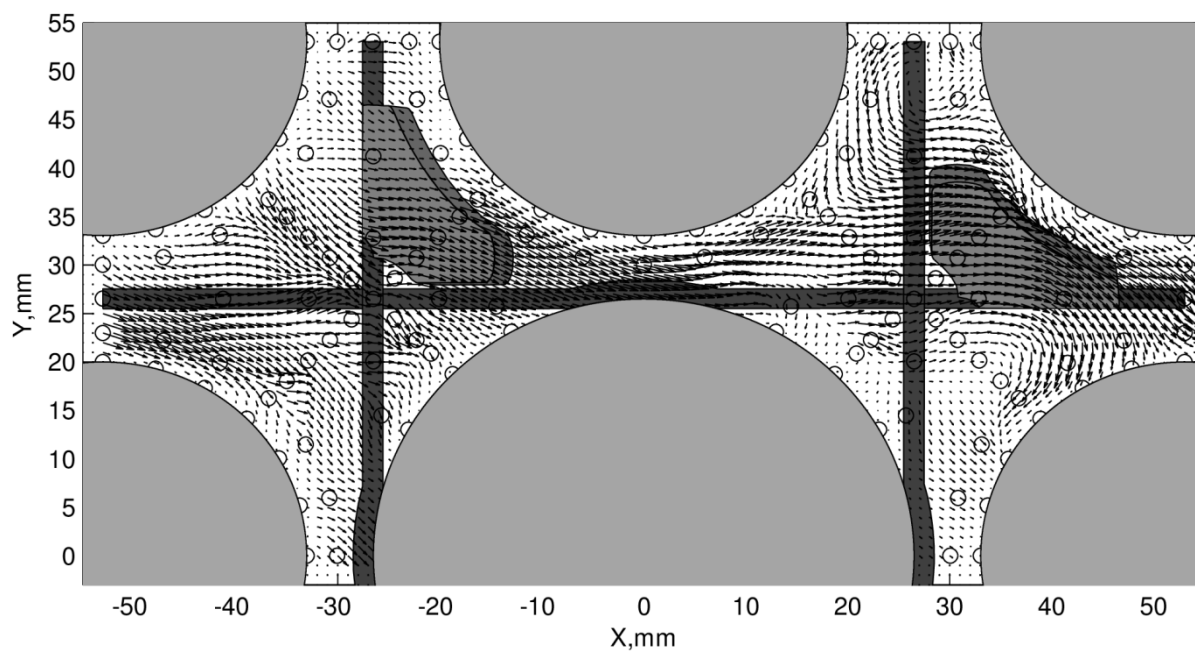


Рис. 7. Векторное поле в области НК при постановке ПДР с дефлекторами типа «косой гиб» при $l/d_z=5,24$ ($\bar{W} = 41,50$ м/с, $Re = 105000$)

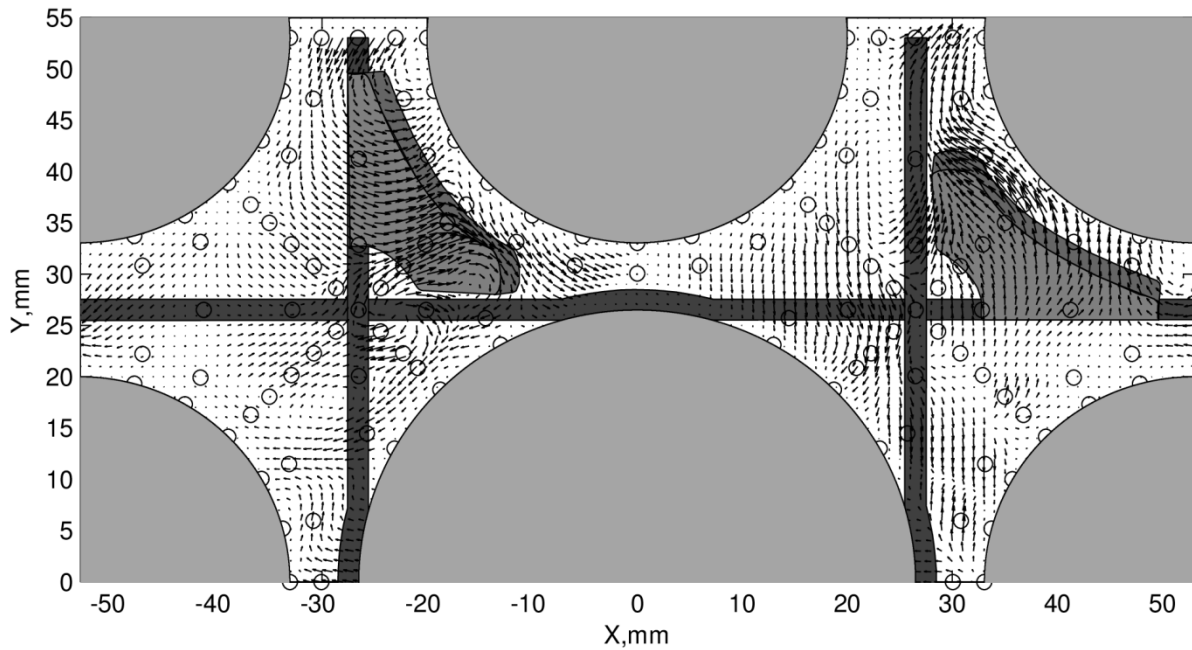


Рис. 8. Векторное поле в области НК при постановке ПДР с дефлекторами типа «обратный гиб» при $l/d_z=27,52$ ($\bar{W} = 37,50$ м/с, $Re = 95700$)

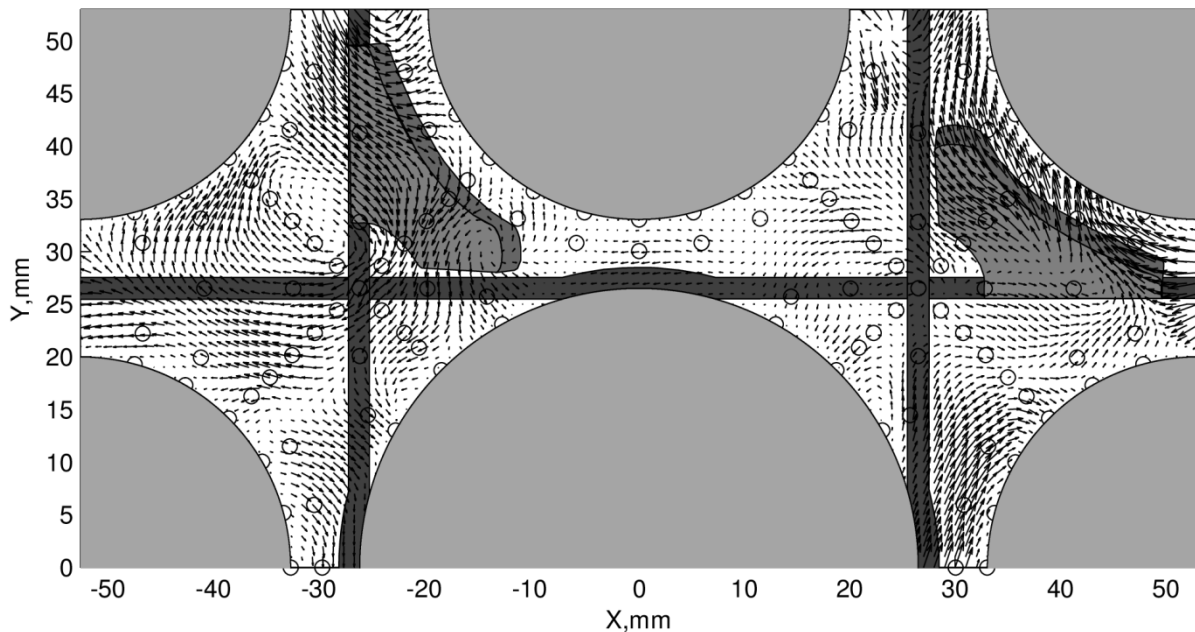


Рис. 9. Векторное поле в области НК при постановке ПДР с дефлекторами типа «обратный гиб» при $l/d_z=5,24$ ($\bar{W} = 37,50$ м/с, $Re = 95700$)

Экспериментальные исследования локальных полей скорости позволили определить распределение расхода теплоносителя в исследуемой области. Различия ориентации дефлекторов и площадей проходных сечений ячеек, прилежащих к НК, и стандартных ячеек ТВС-КВАДРАТ приводит к перераспределению расходов теплоносителя за ПДР. Непосредственно за ПДР с дефлекторами типа «косой гиб» наблюдается вытеснение расхода, которое достигает 30% по отношению к расходу через стандартную ячейку, и на выходе из модели различие расходов между данными ячейками составляет 10% (рис. 10). В случае установки ПДР с дефлекторами типа «обратный гиб» и «прямой гиб» происходит изменение расхода теплоносителя через эти ячейки на 15-20% по сравнению с расходом через стандартную ячейку и остается практически неизменным на всей длине исследуемого участка (рис. 11, 12).

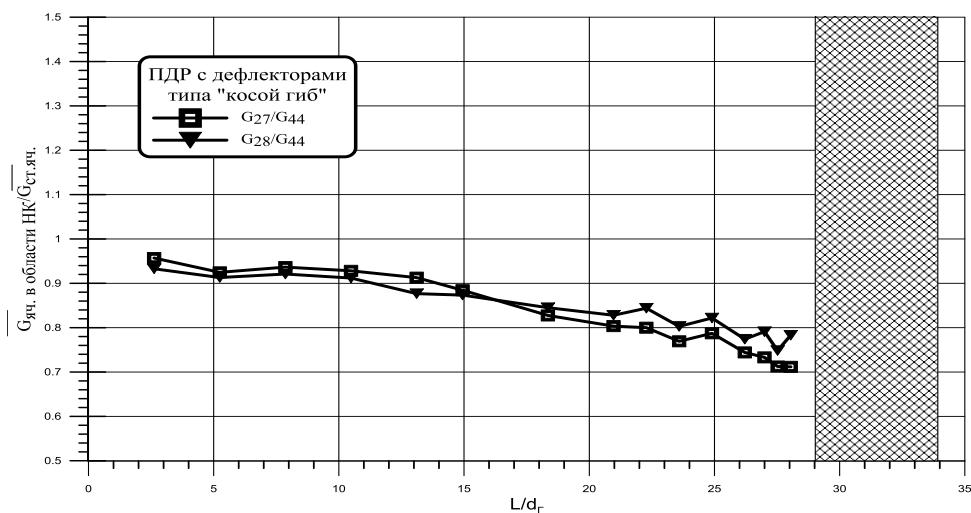


Рис. 10. Отношение распределения расхода теплоносителя через ячейки №27 и №28 (прилежащие к НК) к стандартной ячейке №44 при постановке ПДР с дефлекторами типа «косой гиб»

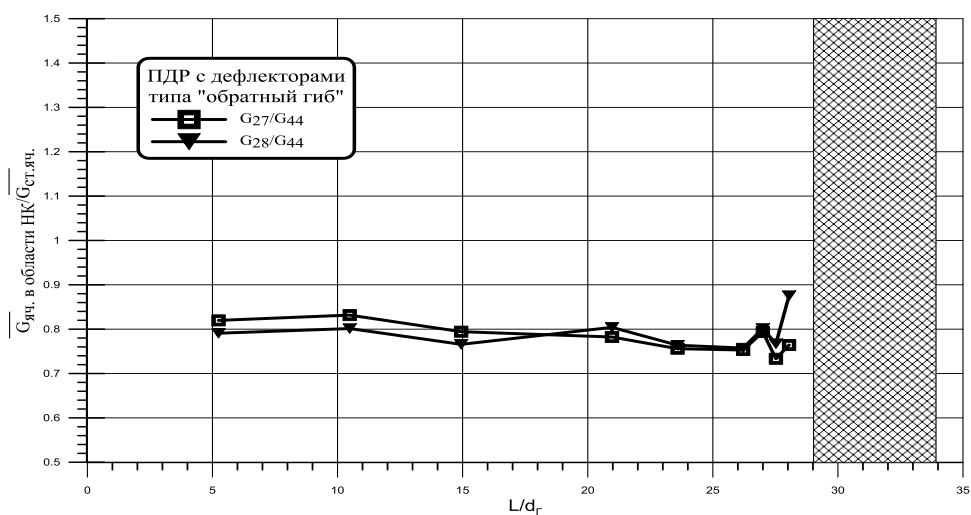


Рис. 11. Отношение распределения расхода теплоносителя через ячейки №27 и №28 (прилежащие к НК) к стандартной ячейке №44 при постановке ПДР с дефлекторами типа «обратный гиб»

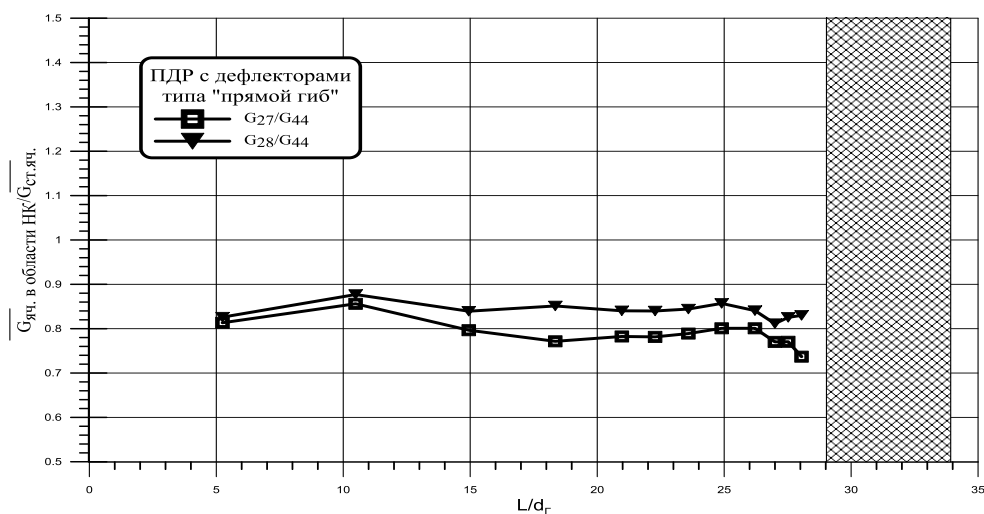


Рис. 12. Отношение распределения расхода теплоносителя через ячейки №27 и №28 (прилежащие к НК) к стандартной ячейке №44 при постановке ПДР с дефлекторами типа «прямой гиб»

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 межъячеечного 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.

Выводы

По результатам проведенных комплексных исследований по определению локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя за перемешивающими дистанционирующими решетками в области НК ТВС-Квадрат реактора PWR были выявлены следующие закономерности.

1. Установка перемешивающих дистанционирующих решеток, снабженных дефлекторами, вносит возмущения в поток теплоносителя, одновременно создавая круговые поперечные течения теплоносителя вокруг твэлов и закрутку потока в межтвэльном пространстве:

- в ячейках, где дефлекторы направляют теплоноситель в аналогичные ячейки области НК, за всеми из исследуемых типов дефлекторов образуется вихрь, затухающий на расстоянии $\Delta l/d_r \approx 3$ от ПДР;
- в ячейках НК, где дефлекторы направляют поток в стандартные ячейки, за ПДР с дефлекторами типа «косой гиб» и «прямой гиб» возникает вихрь с длиной затухания $\Delta l/d_r \approx 5-8$ от решетки, омывающий поперечным потоком два прилежащих твэла, при постановке решетки с дефлекторами типа «обратный гиб» вихрь затухает на расстоянии $\Delta l/d_r \approx 14$ за ПДР;
- длина затухания возмущений, вызванных ПДР в ячейках, прилежащих к НК, с дефлекторами типа «прямой гиб», «косой гиб» и «обратный гиб» заканчивается на расстоянии $\Delta l/d_r \approx 10-14$.

2. Различие ориентации дефлекторов и площадей проходных сечений ячеек, прилежащих к НК, и стандартных ячеек ТВС-квадрат приводит к перераспределению расходов теплоносителя за ПДР:

- непосредственно за ПДР с дефлекторами типа «косой гиб» наблюдается вытеснение расхода, достигающее 30% по отношению к расходу через стандартную ячейку; на выходе из модели различие расходов между данными ячейками составляет 10%;
- в случае установки ПДР с дефлекторами типа «обратный гиб» и «прямой гиб» расход теплоносителя через данные ячейки изменяется на 15-20% по сравнению с расходом через стандартную ячейку и остается практически неизменным на всей длине исследуемого участка.

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 «03» декабря 2014 г. (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

Библиографический список

1. **Балыбердин, А.С.** Особенности гидродинамики и массообмена теплоносителя в ТВСА-АЛЬФА реактора ВВЭР / А.С. Балыбердин [и др.] // Известия высших учебных заведений. 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 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 30.09.2015*

P.V. Arsenov, A.A. Dobrov, D.V. Doronkov, E.N. Polozkova, V.D. Sorokin, A.E. Khrobostov

INVESTIGATION OF COOLANT FLOW BEHIND the MIXING GRID HAVING VARIOUS TYPE OF VANES IN THE REGION OF THE CONTROL ROD 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 Kvadrat_Type 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: Experimental researches of hydrodynamics in the nuclear reactor FA were organized. The heat carrier flow features in Kvadrat_Type fuel assemblies of PWR reactors were revealed.

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

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

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