

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТВС-КВАДРАТ РЕАКТОРА PWR ПРИ ПОСТАНОВКЕ ПЕРЕМЕШИВАЮЩИХ ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИХ РЕШЕТОК С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ДЕФЛЕКТОРОВ

С.М. Дмитриев, С.С. Бородин, А.В. Варенцов, М.А. Легчанов,  
В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24*



Приведены результаты экспериментальных исследований локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя в тепловыделяющих сборках реакторов PWR при использовании различных перемешивающих дистанционирующих решеток. В процессе экспериментов выявлены особенности и закономерности течения теплоносителя в пучках твэлов ТВС-Квадрат с различными типами перемешивающих дистанционирующих решеток. Анализ пространственного распределения проекций абсолютной скорости потока позволил детализировать картину течения теплоносителя за перемешивающей дистанционирующей решеткой при установке трех типов дефлекторов. Выявлена оптимальная конструкция дефлектора для перемешивающей дистанционирующей решетки ТВС-Квадрат в стандартной ячейке и области направляющих каналов. Результаты исследования локальной гидродинамики потока теплоносителя в ТВС-Квадрат приняты для практического использования в АО «ОКБМ Африкантов» при оценке теплотехнической надежности активных зон реакторов PWR и включены в базу данных для верификации программ вычислительной гидродинамики (CFD-кодов) и детального поэлементного расчета активной зоны реакторов PWR.

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

### ВВЕДЕНИЕ

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 основу создания новых ТВС положен многолетний опыт разработки, изготовления и эксплуатации ядерного топлива в реакторах ВВЭР-1000. В частности, в конструкции ТВС-Квадрат использованы апробированные и зарекомендовавшие себя в ТВС для реакторов ВВЭР-1000 конст-

© С.М. Дмитриев, С.С. Бородин, А.В. Варенцов,  
М.А. Легчанов, В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов, 2015

рукторские решения по каркасу ТВС и дистанционирующей решетке, которые позволяют повысить эксплуатационную надежность ядерного топлива в реакторах PWR [1].

Конструкция ТВС-Квадрат имеет дистанционирующие и дополнительно устанавливаемые перемешивающие решетки, которые играют роль турбулизаторов потока теплоносителя и интенсификаторов теплообмена. Установка подобных элементов влияет на эффективность перемешивания теплоносителя и, как следствие, на величину критических тепловых потоков и запас до кризиса теплоотдачи.

Применение отечественной конструкции ТВС-Квадрат с перемешивающими дистанционирующими решетками в реакторе PWR требует обоснования теплотехнической надежности активных зон и определения влияния конструкций решеток на гидродинамику потока теплоносителя [2].

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 и активных зон на аэро- и гидродинамических стендах [3, 4].

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

Исследование гидродинамики потока теплоносителя и сравнение перемешивающих дистанционирующих решеток, с точки зрения интенсивности перемешивания, в ТВС-Квадрат проводились в НГТУ им. Р.Е. Алексеева на аэродинамическом экспериментальном стенде.

Принцип работы исследовательского стенда заключается в том, что поток воздуха посредством радиального вентилятора высокого давления поступает в ресиверную емкость, движется через расходомерное устройство и успокоительный участок, а затем, пройдя через экспериментальную модель (ЭМ), выбрасывается в атмосферу [5].

Экспериментальная модель представляет собой фрагмент ТВС-Квадрат реактора типа PWR и выполнена в полном геометрическом подобии штатной топливной сборки.

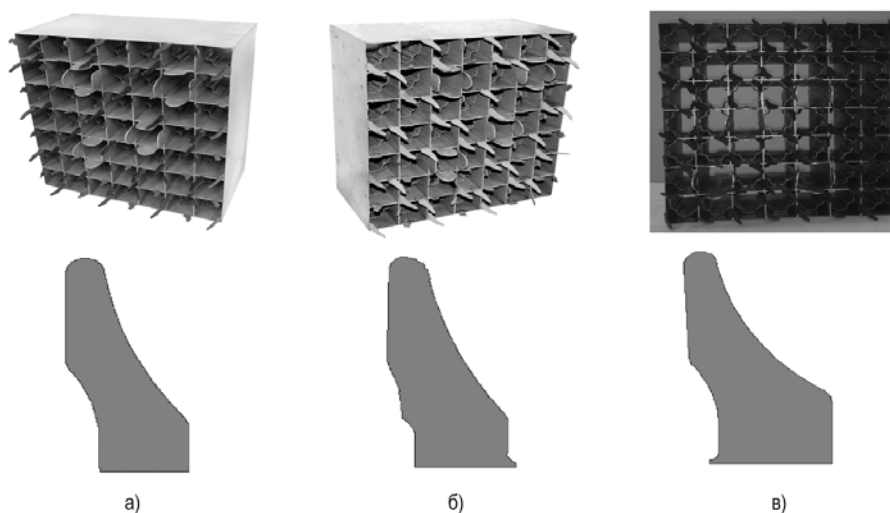


Рис. 1. Выходная часть экспериментальной модели: а) – дефлектор «прямогогиба»; б) – дефлектор «косогогиба»; в) – дефлектор «обратногогиба»

На рисунке 1 представлены исследуемые пояса перемешивающих дистанционирующих решеток (ПДР) с различными типами дефлекторов. Пояс ПДР представляет собой взаимно перпендикулярные ряды пластин, установленных в общий бандаж.

На верхних кромках пластин ПДР установлены дефлекторы таким образом, что на каждый твэл приходится по два дефлектора, расположенных диагонально [6].

### МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТВС-КВАДРАТ РЕАКТОРА PWR

Исследования локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя заключаются в измерении модуля вектора скорости, углов набегания потока и статического давления пятиканальным пневмометрическим зондом внутри трубного пучка экспериментальной модели. Для получения полной информации о трехмерном течении потока теплоносителя исследования проводились в стандартной ячейке и двух ячейках, прилежащих к НК (ячейки №44 и 27, 28 соответственно) (рис. 2).

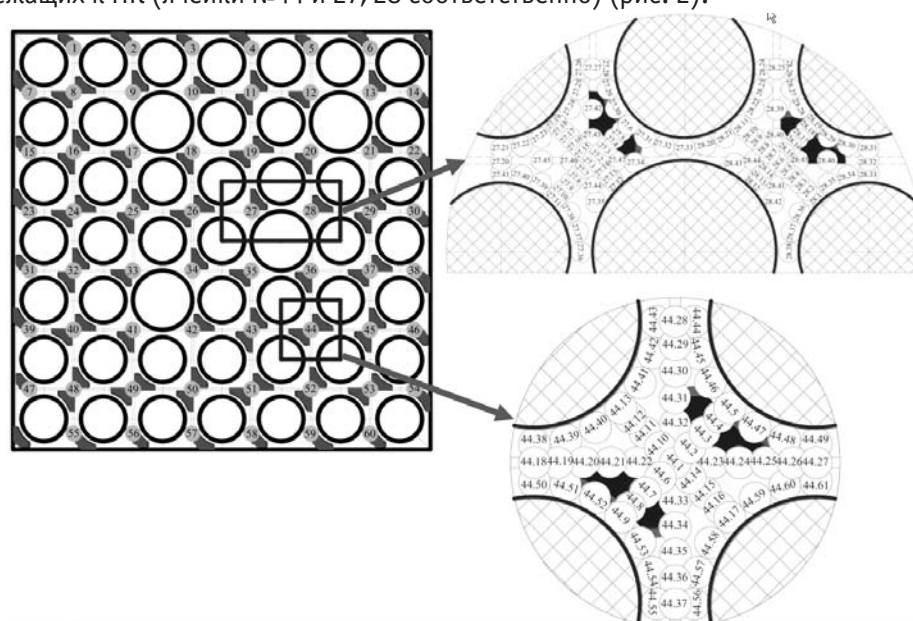


Рис. 2. Характерные зоны измерения вектора скорости

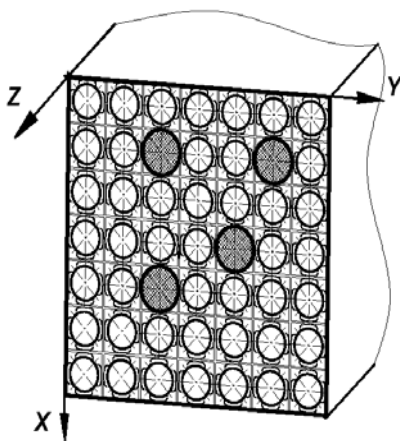


Рис. 3. Схема расположения координатных осей

Координаты каждой точки замера представлены в декартовой системе координат (рис. 3).

Анализ распределения поперечных составляющих вектора скорости в поперечном сечении и по длине модели в двух выбранных областях за ПДР ЭМ позволил определить особенности и закономерности движения потока теплоносителя в ТВС-Квадрат реактора PWR.

### ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

В состав измерительного комплекса входят ЭВМ с программным обеспечением, трубка Пито-Прандтля, пятиканальный пневмометрический зонд, блок аналоговых преобразователей давления.

Измерение вектора скорости потока теплоносителя осуществлялось пятиканальным пневмометрическим зондом. Предельные отклонения проекций относительной скорости на осях  $X, Y, Z$  не превышали 7% от абсолютной скорости. Перед проведением исследований зонд тарировали в воздушном потоке с известными и постоянными по сечению канала направлением и значением скорости.

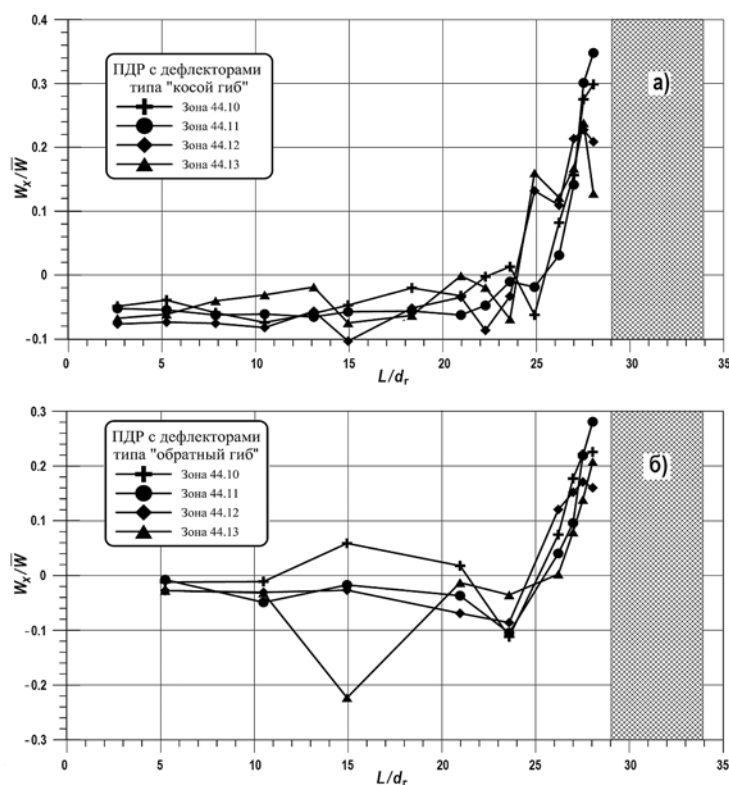
Снятие показаний с пятиканального пневмометрического зонда производилось блоком аналоговых преобразователей давления. Предел допускаемой основной погрешности данных приборов составляет  $\pm 0,25\%$  [7, 8].

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРОДИНАМИКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТВС-КВАДРАТ РЕАКТОРА РWR

За любым из исследуемых типов дефлекторов образуется вихревое течение, которое прекращается на расстоянии  $\Delta l/d_f = 3 - 5$  за дефлекторами типа «косой гиб» и «обратный гиб» (рис. 4а,б) и  $\Delta l/d_f = 10 - 12$  за дефлекторами типа «прямой гиб» ( $\Delta l/d_f$  – характерные отрезки распространения возмущений;  $l/d_f$  – координата с расположением сечения измерения вектора скорости, где  $l$  – длина до сечения измерения от выхода модели,  $d_f$  – гидравлический диаметр) (рис. 4в).

В районе направляющего канала за ПДР с различными типами дефлекторов выделим парные ячейки по варианту расположения дефлекторов:

- ячейки, где дефлекторы направляют теплоноситель в аналогичные ячейки области НК;
- ячейки, где дефлекторы направляют поток из области НК в стандартные ячейки.



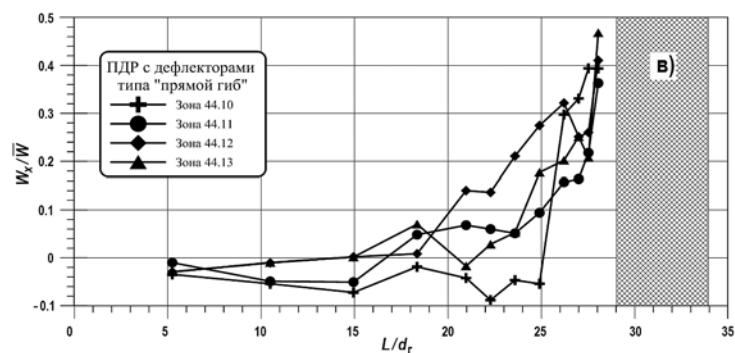


Рис. 4. Распределение относительных скоростей при постановке ПДР с исследуемыми дефлекторами для зон №№ 44.10, 44.11, 44.12, 44.13: а) – дефлектор типа «косой гиб»; б) – дефлектор типа «обратный гиб»; в) – дефлектор типа «прямой гиб»

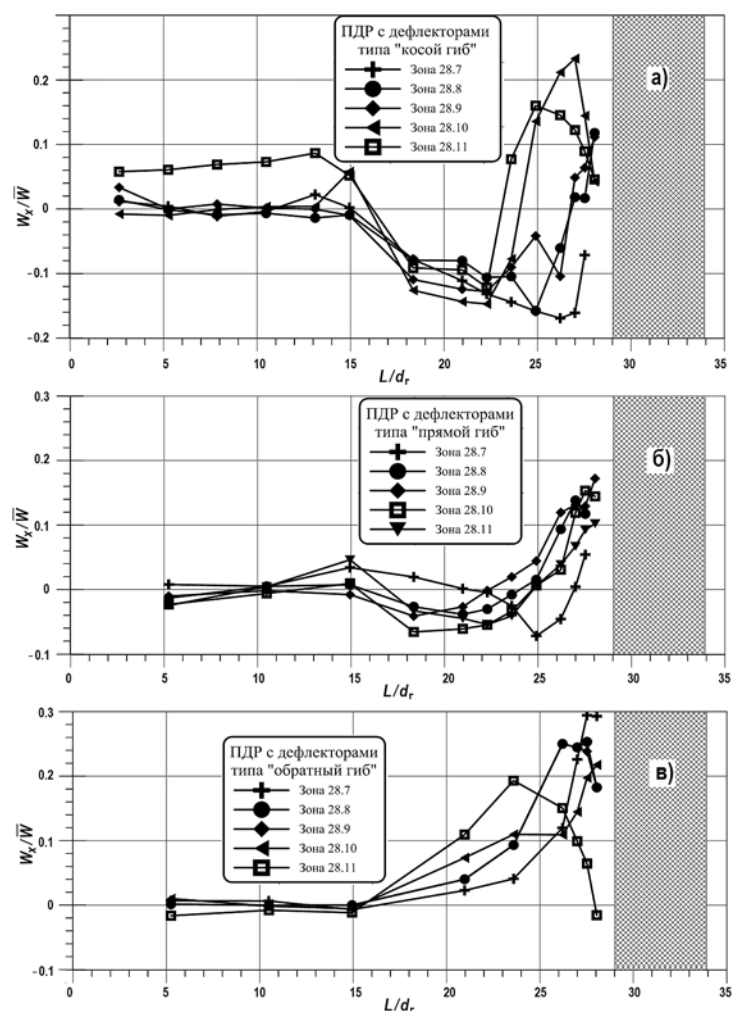


Рис. 5. Распределение относительных поперечных скоростей при постановке ПДР с дефлекторами типа «обратный гиб» для зон №№ 28.7, 28.8, 28.9, 28.10, 28.11: а) – дефлектор типа «косой гиб»; б) – дефлектор типа «прямой гиб»; в) – дефлектор типа «обратный гиб»

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



$\Delta/d_r \approx 5 - 8$  от решетки (рис. 5а,б), омывая поперечным потоком два прилежащих твэла.

При постановке решетки с дефлекторами типа «обратный гиб» вихрь в этой же области затухает на расстоянии  $\Delta/d_r \approx 14$  за ПДР (рис. 5в).

Длина затухания возмущений, вызванных ПДР в ячейках, прилежащих к НК, с дефлекторами типа «прямой гиб», «косой гиб» и «обратный гиб» заканчивается на расстоянии  $\Delta/d_r \approx 10 - 14$  (рис. 6).

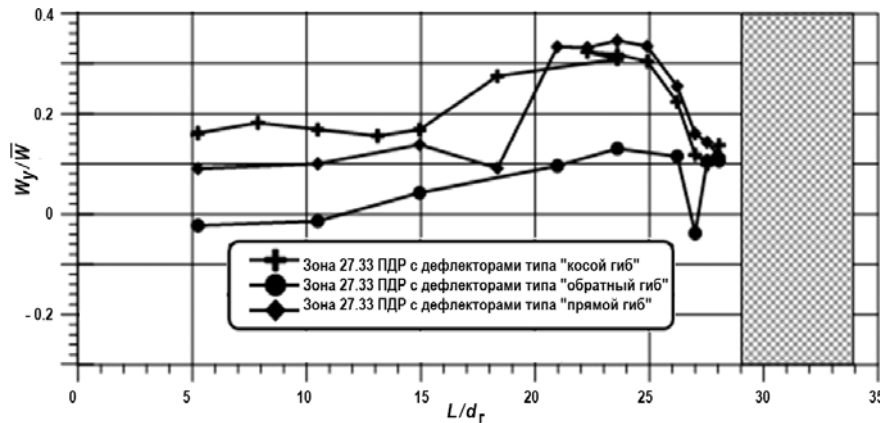


Рис. 6. Распределение относительных поперечных скоростей при постановке ПДР с дефлекторами типа «косой гиб», «обратный гиб» и «прямой гиб» для зоны № 27.33

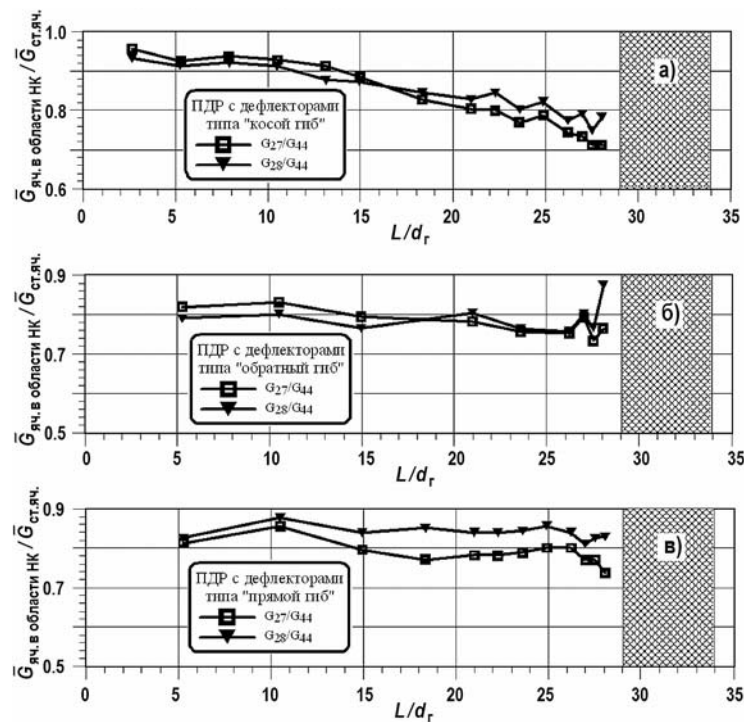


Рис. 7. Отношение распределения расхода теплоносителя через ячейки №27 и №28 (прилежащие к НК) к стандартной ячейке №44 при постановке ПДР с исследуемыми дефлекторами: а) – дефлектор типа «косой гиб»; б) – дефлектор типа «обратный гиб»; в) – дефлектор типа «прямой гиб»

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, которое достигает 30% по отношению к

расходу через стандартную ячейку, и на выходе из модели различие расходов между данными ячейками составляет 10% (рис. 7а). 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. 7б,в).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных комплексных исследований определены гидродинамические характеристики потока и выявлены особенности течения теплоносителя в ТВС-Квадрат реактора PWR с дефлекторами типа «косой гиб», «прямой гиб», «обратный гиб»:

а) за любым типом дефлекторов образуется вихревое течение, которое прекращается на расстоянии  $\Delta l/d_f = 3 - 5$  за дефлекторами типа «косой гиб» и «обратный гиб», и на расстоянии  $\Delta l/d_f = 10 - 12$  за дефлекторами типа «прямой гиб»;

б) 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  $\Delta l/d_f \approx 5 - 8$  от решетки, омывая поперечным потоком два прилежащих твэла; при постановке решетки с дефлекторами типа «обратный гиб», вихрь в этой же области затухает через  $\Delta l/d_f \approx 14$  за ПДР;

в) длина затухания возмущений за ПДР в ячейках, прилежащих к НК, с дефлекторами типа «прямой гиб», «косой гиб» и «обратный гиб» составляет  $\Delta l/d_f \approx 10 - 14$ ;

г) при установке 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%. 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.

В результате экспериментальных исследований полей скорости было установлено, что с точки зрения турбулизации потока в стандартной ячейке дефлектор «прямогогиба» обладает лучшими свойствами, а в области направляющих каналов – лучшим является дефлектор «обратногогиба».

Полученные результаты могут быть использованы в качестве базы данных для верификации CFD-кодов и программ детального поэлементного расчета активных зон водоводяных ядерных реакторов типа PWR с целью уменьшения консерватизма при обосновании теплотехнической надежности активных зон.

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания №2014/133.

## Литература

1. Бых О.А., Дмитриев С.М., Зверев Д.Л., Панов Ю.К., Сорокин Н.М., Фарафонов В.А. Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах: учебник. / Под ред. С.М. Дмитриева – М.: Машиностроение. - 2013.
2. Дмитриев С.М., Баринин А.А., Бородин В.Е., Хробостов А.Е. К вопросу о методологии обоснования теплотехнической надежности активных зон водяных энергетических реакторов. / Труды НГТУ №2 (104), 2014 г., С. 98-108.
3. Дмитриев С.М., Доронков Д.В., Пронин А.Н., Солнцев Д.Н., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е. Расчетно-экспериментальные исследования гидродинамики и массообмена теплоносителя за дистанционирующей решеткой тепловыделяющей сборки реактора плавучего энергоблока. // Известия вузов. Ядерная энергетика - №4 - 2014. - С. 60-68.
4. Дмитриев С.М., Варенцов А.В., Добров А.А., Солнцев Д.Н., Хробостов А.Е. Экспериментальные и расчетные исследования гидродинамики и массообмена потока теплоносителя

в модели ТВС реактора КЛТ40С. // Научно-технический вестник Поволжья. – Казань: 2013. №3. С. 114-119.

5. *Дмитриев С.М., Самойлов О.Б., Хробостов А.Е., Варенцов А.В., Добров А.А., Доронков Д.В., Сорокин В.Д.* Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в ТВС-Квадрат реакторов PWR с перемешивающими решетками // Теплоэнергетика. 2014. №8. С. 20-27.

6. *Дмитриев С.М., Хробостов А.Е., Легчанов М.А., Бородин С.С., Солнцев Д.Н., Сорокин В.Д.* Особенности локальной гидродинамики и массообмена теплоносителя в ТВС реакторов ВВЭР и PWR с перемешивающими решетками // Тепловые процессы в технике – 2013. Т.5. №3. С.98-107.

7. *Дмитриев С.М., Бородин С.С., Легчанов М.А., Солнцев Д.Н., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е.* Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР // Атомная энергия. 2012. Т.113. Вып.5. С.252-257.

8. *Дмитриев С.М., Варенцов А.В., Доронков Д.В., Добров А.А., Легчанов М.А., Хробостов А.Е.* Исследование локальной гидродинамики и межъячейкового массообмена потока теплоносителя в районе направляющих каналов тепловыделяющих сборок реакторов PWR // Промышленная энергетика – 2013. №12. С. 45-50.

Поступила в редакцию 13.03.2015 г.

#### Авторы

Дмитриев Сергей Михайлович, ректор, профессор, доктор техн. наук

E-mail: dmitriev@nntu.nnov.ru

Бородин Сергей Сергеевич, зам. директора ИЯЭ и ТФ, доцент, канд. техн. наук

E-mail: borodinss@mail.ru

Варенцов Андрей Владиславович, аспирант,

E-mail: varentsov.andrey@gmail.com

Легчанов Максим Александрович, зам. директора ИЯЭ и ТФ, доцент, канд. техн. наук

E-mail: legchanov@mail.ru

Сорокин Владислав Дмитриевич, ассистент

E-mail: vlad.sorokin1987@mail.ru

Хробостов Александр Евгеньевич, директор ИЯЭ и ТФ, доцент, канд. техн. наук

UDC 621.039

### EXPERIMENTAL RESEARCHES OF LOCAL HYDRODYNAMICS OF COOLANT IN PWR FA-KVADRAT USING DIFFERENT MIXING GRIDS

Dmitriev S.M., Borodin S.S., Varentsov A.V., Legchanov M.A., Sorokin V.D.,  
Khrobostov A.E.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

24, Minin st., Nizhny Novgorod, 603950 Russia

#### ABSTRACT

There are results of experimental researches of local hydrodynamic characteristics of the coolant flow in the fuel assemblies PWR reactors using different mixing grids. The characteristics and patterns of coolant flow in the FA-Kvadrat with different types of mixing grids identified in the course of the experiments. The analysis of the spatial distribution of the projections of the



absolute flow rate detailed picture of coolant flow for mixing grid with the installation of the three types of deflectors. There have been found the optimal design of the deflector for mixing FA-Kvadrat spacer grids in the standard cell and in the field guide channels. The results of the study of the local hydrodynamics of the coolant flow in the FA-KVADRAT adopted for practical using in «OKBM Africantov» in assessing the reliability of heat engineering PWR reactor cores and included in the database of verification of the computational fluid dynamics software (CFD-code) and detailed calculation of the PWR reactor's core.

**Key words:** nuclear reactor, fuel assembly, the coolant flow hydrodynamic, heat and mass transfer, mixing grid.

#### REFERENCES

1. Bykh O.A., Dmitriev S.M., Zverev D.L., Panov Y.K., Sorokin N.M., Farafonov V.A. Osnovnoe oborudovanie AES s korpusnymi reaktorami na teplovykh neytronah [The main equipment of nuclear power plants with a tank reactor with thermal neutrons]. Moscow. Mashinostroyeniye Publ., 2013 (in Russian).
2. Barinov A.A., Borodina V.E., Dmitriev S.M., Khrobostov A.E. K voprosu o metodologii obosnovaniya teplotekhnicheskoy nadezhnosti aktivnykh zon vodyanykh energeticheskikh reaktorov [On the issue of core cooling reliability substantiation methodology for the pressurized water reactors]. Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva. 2014. no. 2, pp. 98-108 (in Russian).
3. Dmitriev S.M., Doronkov D.V., Pronin A.N., Solntsev D.N., Sorokin V.D., Khrobostov A.E. Raschetno-eksperimentalnyye issledovaniya gidrodinamiki i massoobmena teplonositelya za distancioniruyemye rechetki teplovyydelnykh sborki reaktora plavuchego energobloka [Combined numerical and experimental investigations of hydrodynamics and coolant flow mass transfer out of spacer grid in fuel assemblies of floating power unit]. Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika. 2014. no. 4, pp. 60-70 (in Russian).
4. Varentsov A.V., S.M. Dmitriev S.M., Dobrov A.A., Solntsev D.N., Khrobostov A.E. Eksperimentalnyye i raschetnyye issledovaniya gidrodinamiki i massoobmena potoka teplonositelya v modeli TVS reaktora KLT-40S [Experimental and numerical researches of hydrodynamics and mass transfer of coolant flow in experimental model of KLT-40S reactor fuel assembly]. Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Povolzh'ya. 2013, no. 3, pp. 114-119 (in Russian).
5. Varentsov A.V., Dmitriev S.M., Dobrov A.A., Doronkov D.V., Samoilov O. B., Sorokin V.D., Khrobostov A.E. Raschetno-eksperimentalnyye issledovaniya lokalnoy gidrodinamiki i massoobmena potoka teplonositelya v TVS-Kvadrat reaktorov PWR s peremeshivayuschimi reshetkami [Combined numerical and experimental investigations of local hydrodynamics and coolant flow mass transfer in Kvadrat type fuel assemblies of PWR reactors with mixing grids]. Teploenergetika. 2014. no. 8, pp. 20-27 (in Russian).
6. Dmitriev S.M., Borodin S.S., Legchanov M.A., Solntsev D.N., Sorokin V.D., Khrobostov A.E. Osobennosti lokalnoy gidrodinamiki i massoobmena teplonositelya v TVS reaktorov VVER i PWR s peremeshivayuschimi reshetkami [Features of local hydrodynamics and mass exchange of the heat-carrier in fuel rod assemblies of VVER and PWR with mixing grids]. Teplovyie processy v tekhnike. 2013, v. 5 (iss. 3), pp. 98-107 (in Russian).
7. Borodin S.S., Dmitriev S.M., Legchanov M.A., Solntsev D.N., Sorokin V.D., Khrobostov A.E. Eksperimentalnyye issledovaniya gidrodinamicheskikh i massoobmennyykh harakteristik potoka teplonositelya v TVSA VVER [Experimental studies of hydrodynamic and mass-transfer properties of coolant flow in VVER fuel assemblies TVSA]. Atomnaya energiya. 2012, v. 113 (iss. 5), pp. 252-257 (in Russian).
8. Dmitriev S.M., Varentsov A.V., Doronkov D.V., Dobrov A.A., Legchanov M.A., Khrobostov A.E. Issledovaniya lokalnoy gidrodinamiki i massoobmena potoka teplonositelya v raione napravlyayuchikh kanalov teplovyydelnykh sborok reaktorov PWR [Researches of local hydrodynamics and mass-transfer flow of coolant in guide channels area PWR FA-KVADRAT]. Promyshlennaya energetika. 2013, no. 12, pp. 45-50 (in Russian).

**Authors**

Dmitriev Sergej Mihajlovich, Rector, Professor, Dr.Sci. (Engineering)

E-mail: dmitriev@nntu.nnov.ru

Borodin Sergej Sergeevich, Deputy Director, Assistant Professor, Cand. Sci. (Engineering).

Varentsov Andrej Vladislavovich, PhD student

E-mail: varentsov.andrey@gmail.com

Legchanov Maksim Aleksandrovich, Deputy director, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: legchanov@mail.ru

Sorokin Vladislav Dmitrievich, Assistant

E-mail: vlad.sorokin1987@mail.ru

Khrobostov Aleksandr Evgen'evich, Director, Assistant Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: khrobostov@nntu.nnov.ru