

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В СМЕШАННОЙ АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА ВВЭР-1000 АЭС «ТЕМЕЛИН»

С.М. Дмитриев, Д.В. Доронков, Е.Н. Полозкова, А.Н. Пронин,
В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов

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



Представлены результаты исследований межкассетного взаимодействия теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР-1000 АЭС «Темелин». Изучение процессов течения теплоносителя в твэльном пучке ТВСА проводилось на аэродинамическом экспериментальном стенде. Для получения более детальной информации о гидродинамических характеристиках потока теплоносителя в качестве модели был выбран фрагмента активной зоны реактора ВВЭР-1000, состоящий из двух сегментов ТВСА-12 PLUS и одного сегмента ТВСА-Т с уголками жесткости и межкассетным пространством. Исследования гидродинамических характеристик теплоносителя заключались в измерении вектора скорости как в характерных областях ТВСА, так и в области межкассетного пространства с помощью пятиканального пневмометрического зонда. Анализ пространственного распределения проекций абсолютной скорости потока позволил детализировать картину обтекания дистанционирующих, перемешивающих и комбинированных дистанционирующих решеток ТВСА, определить области реализации максимального поперечного потока теплоносителя, глубину распространения возмущений и перераспределение расхода теплоносителя в смежных кассетах ТВСА. Результаты исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя между соседними ТВСА используются в АО «ОКБМ Африкантов» для уточнения методики теплогидравлического расчета активных зон ядерных реакторов типа ВВЭР-1000 и включены в базу данных для верификации программ вычислительной гидродинамики (CFD-кодов) и детального почечечного расчета активной зоны реакторов ВВЭР-1000.

Ключевые слова: активная зона, тепловыделяющая сборка, дистанционирующие и перемешивающие решетки, межкассетное взаимодействие, гидродинамика теплоносителя.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальной задачей для ГК «Росатом» является увеличение доли присутствия российских компаний на международном рынке. Укрепление позиций невозможно без

© С.М. Дмитриев, Д.В. Доронков, Е.Н. Полозкова, А.Н. Пронин,
В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов, 2015

совершенствования поставляемого оборудования, в том числе оптимизации конструкции тепловыделяющих сборок (ТВС).

АО «ОКБМ Африкантов» осуществляет разработку и проектирование ТВС для реакторов типа ВВЭР, расположенных как в России, так и за ее пределами. Одним из партнеров предприятия является чешская АЭС «Темелин», активная зона первого блока которой эксплуатируется с полной загрузкой из ТВСА-Т.

Конструкция ТВСА-Т характеризуется применением комбинированных дистанционирующих решеток (КДР), состоящих из ячейковой дистанционирующей решетки (ДР) и пластинчатой перемешивающей решетки (ПР) с размещением дефлекторов по схеме «закрутка» [1].

В настоящее время произведена частичная замена ТВСА-Т на более совершенную ТВСА-12 PLUS, которая отличается оптимизированным размещением ДР и применением ПР с размещением дефлекторов по схеме «порядная прогонка».

Поскольку оба типа ТВС являются бесчехловыми, перемешивание теплоносителя происходит не только в пределах одной кассеты, но и между соседними кассетами. Данное явление необходимо учитывать в процессе оценки и обоснования теплотехнической надежности активной зоны реактора ВВЭР, что обусловило необходимость проведения комплекса исследований межкассетного взаимодействия потока теплоносителя [2].

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. В состав стенда входят вентилятор высокого давления, ресиверная емкость, экспериментальная модель (ЭМ), расходомерное устройство, измерительный комплекс [3, 4]. Во время работы стенда воздух посредством вентилятора высокого давления нагнетается в ресиверную емкость, далее проходит успокоительный участок, ЭМ и выбрасывается в атмосферу.

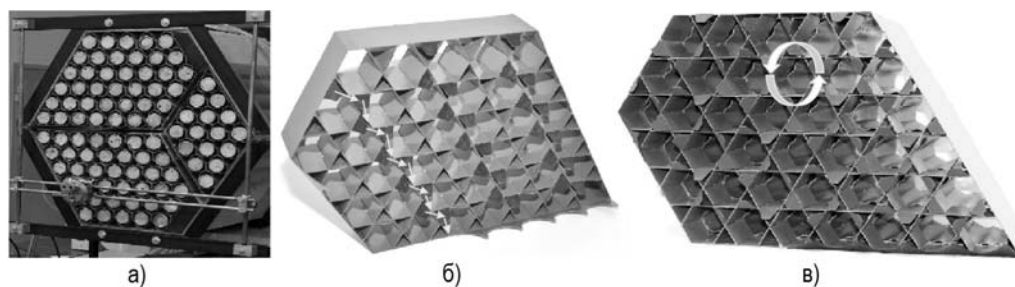


Рис. 1. Экспериментальная модель и исследуемые пояса решеток ТВСА: а) – экспериментальная модель; б) – пояс ПР ТВСА-12 PLUS; в) – пояс КДР ТВСА-Т

Экспериментальная модель представляет собой фрагмент активной зоны реактора ВВЭР, включающий в себя два сегмента кассет ТВСА-12 PLUS и один сегмент ТВСА-Т с межкассетным пространством (рис. 1 а), и выполнена с соблюдением полного геометрического подобия.

Пояс перемешивающей решетки ТВСА-12 PLUS (рис. 1 б) имеет турбулизирующие дефлекторы, расположенные по схеме «порядная прогонка» [5]. Пояс КДР ТВСА-Т (рис. 1 в) снабжен турбулизирующими дефлекторами, расположенными по схеме «закрутка вокруг твэла».

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

В состав измерительного комплекса входят пятиканальный пневмометрический зонд, блок аналоговых преобразователей давления и ЭВМ с программным обеспечением.

Измерение вектора скорости потока теплоносителя осуществлялось пятиканальным пневмометрическим зондом. Предельные отклонения проекций абсолютной скорости на оси X , Y , Z не превышали 7% от абсолютной скорости.

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

ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Важным этапом проведения экспериментальных исследований является подтверждение их представительности. Поскольку моделирование течения водяного теплоносителя осуществляется воздухом, то на основе теории подобия можно утверждать, что в области автомодельности профиль относительной скорости остается практически неизменным. Следовательно, проведение исследований межкассетного взаимодействия теплоносителя на ЭМ в зоне автомодельности позволит перенести результаты эксперимента на натурные условия течения теплоносителя в штатных активных зонах. Для этого был проведен ряд испытаний, направленных на определение режимов течения теплоносителя в ЭМ, нахождение границ зон автомодельного течения теплоносителя. Согласно полученным результатам, область автомодельного течения в ЭМ начинается при числе Рейнольдса 55000, а все исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя проводились при числе Рейнольдса 80000 на участке стабилизированного автомодельного течения теплоносителя. На аэродинамическом стенде был экспериментально определен коэффициент гидравлического сопротивления (КГС) поясов ДР, ПР и КДР. Проведение данных работ обусловлено тем, что для обоснования представительности экспериментальных исследований требуется соблюдение равенства КГС штатных решеток и решеток ЭМ. Анализ результатов исследований КГС показывает, что выбранная конструкция и геометрические характеристики ДР, ПР и КДР в области автомодельного течения обеспечивают необходимое гидравлическое сопротивление, а полученные значения соответствуют КГС штатных решеток и составляют $\xi_{\text{ДР}} = 0,55$, $\xi_{\text{ПР}} = 0,55$, $\xi_{\text{КДР}} = 1,05$.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ



Рис. 2. Схема расположения ПР, ДР и КДР в продольном сечении ЭМ: а) – верхний фрагмент твэльного пучка ТВСА; б) – нижний фрагмент твэльного пучка ТВСА

Экспериментальные исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя между соседними ТВСА-12 PLUS и ТВСА-T заключались в измерении локальных полей скорости пятиканальным пневмометрическим зондом. Вектор скорости измерялся в

характерной области межкассетного зазора ЭМ с расположением поясов ДР, ПР и КДР, соответствующим верхнему и нижнему фрагментам твэльного пучка ТВСА активной зоны реактора ВВЭР (рис. 2). По полученным данным была построена подробная картина течения теплоносителя.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕЖКАССЕТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В НИЖНЕМ ФРАГМЕНТЕ ТВЭЛЬНОГО ПУЧКА ТВСА-Т И ТВСА-12 PLUS

Анализ результатов экспериментальных исследований позволил сделать следующие выводы.

1. В области межкассетного пространства ЭМ перед КДР ТВСА-Т поперечный поток движется в ТВСА-12 PLUS, а перед ДР ТВСА-12 PLUS имеет обратную направленность. Значение поперечной скорости (W_y/W_{cp}) перед КДР и ДР одинаково, и составляет 30% от среднерасходной скорости (рис. 3).

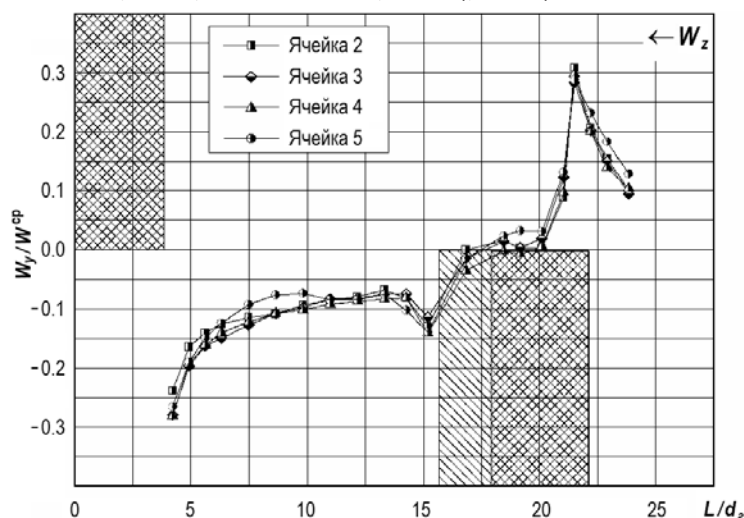


Рис. 3. Распределение относительной поперечной скорости в межкассетном пространстве

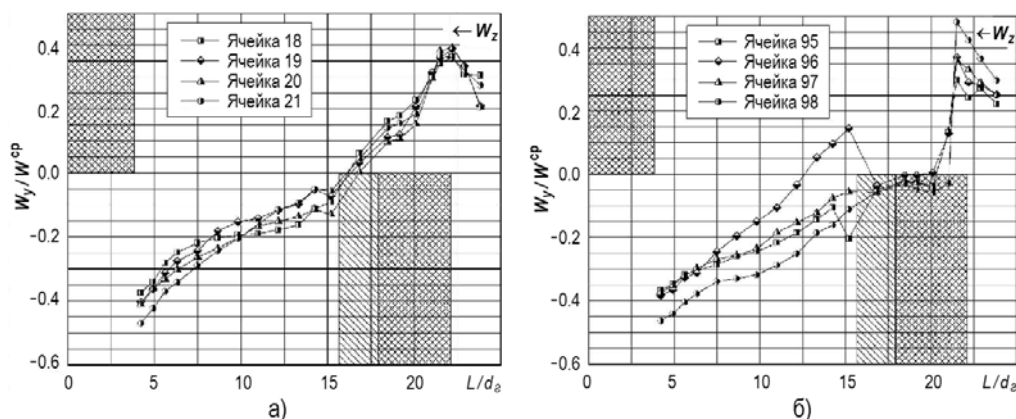


Рис. 4. Распределение относительной поперечной скорости в ряду твэлов, прилежащих к межкассетному пространству: а) – ТВСА-12 PLUS; б) – ТВСА-Т

2. В зазорах между твэлами, прилежащими к межкассетному пространству, реализуется максимальный на данном фрагменте твэльного пучка ТВСА поперечный поток теплоносителя. Поперечная скорость (W_y/W_{cp}) перед КДР и ДР составляет

40% от среднерасходной скорости (рис. 4 а, б).

3. Глубина распространения возмущений потока теплоносителя в кассетах ТВСА-Т и ТВСА-12 PLUS, вызванных обтеканием ДР и КДР, ограничивается твэлами четвертого ряда. Данный факт говорит о том, что интенсивное перераспределение потока между соседними сегментами кассет начинается уже на входе в твэльный пучок модели.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕЖКАССЕТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ВЕРХНЕМ ФРАГМЕНТЕ ТВЭЛЬНОГО ПУЧКА ТВСА-Т И ТВСА-12 PLUS

Основным отличием нижнего и верхнего фрагментов твэльных пучков ТВСА является применение в ТВСА-12 PLUS перемешивающей решетки, конструкция которой предусматривает варианты расположения дефлекторов, представленные на рис. 5.

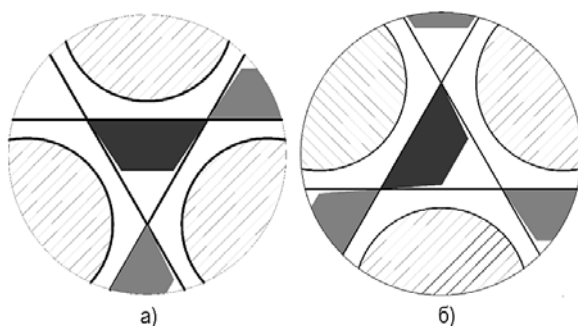


Рис. 5. Расположение дефлектора ПР в ячейке ТВСА-12 PLUS: а) – дефлектор направлен вниз; б) – дефлектор направлен вбок

Анализ экспериментальных данных позволил выявить влияние ПР на межкассетное взаимодействие теплоносителя. Было установлено следующее.

1. Перед КДР ТВСА-Т поперечный поток движется в ТВСА-12 PLUS, а перед ПР и ДР ТВСА-12 PLUS, наоборот, в ТВСА-Т. Значение поперечной скорости (W_y/W_{cp}) в области межкассетного пространства перед КДР и ПР составляет 30% от среднерасходной скорости (рис. 6).

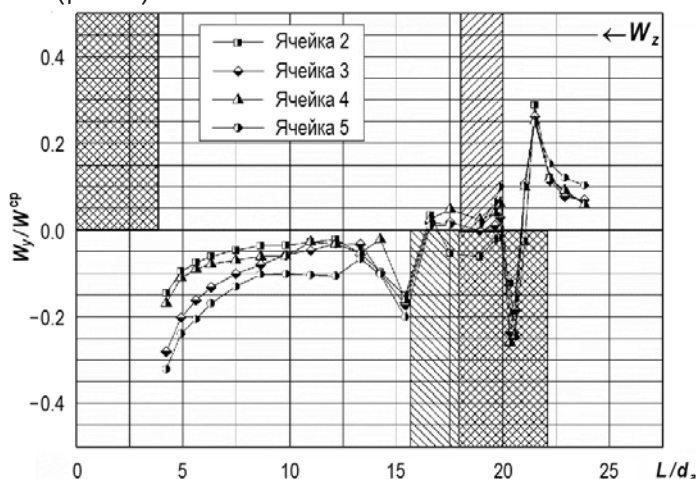


Рис. 6. Распределение относительной поперечной скорости в межкассетном пространстве

2. В областях межкассетного пространства, граничащих с ячейками ТВСА-12 PLUS, где дефлектор направлен в сторону межкассетного пространства, значение относи-

тельной поперечной скорости (W_y/W^{cp}) достигает 30% от среднерасходной скорости, а в областях, граничащих с ячейками, где дефлектор направлен в сторону кассеты ТВСА-12 PLUS, 15% от среднерасходной скорости (рис. 6).

3. В зазорах между твэлами ТВСА-12 PLUS, прилежащими к межкассетному пространству, реализуется поперечный поток теплоносителя, который вызван обтеканием КДР ТВСА-Т. Значение поперечной скорости (W_y/W^{cp}) перед КДР составляет 50% от среднерасходной скорости (рис. 7).

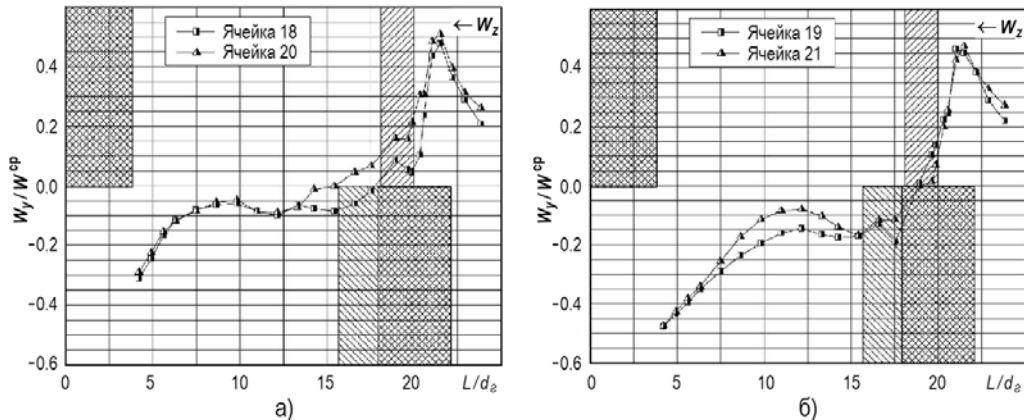


Рис. 7. Распределение относительной поперечной скорости в зазорах между твэлами ТВСА-12 PLUS, прилежащими к межкассетному пространству: а) – зазор, где дефлектор направлен в сторону межкассетного пространства; б) – зазор, где дефлектор направлен в сторону кассеты ТВСА-12 PLUS

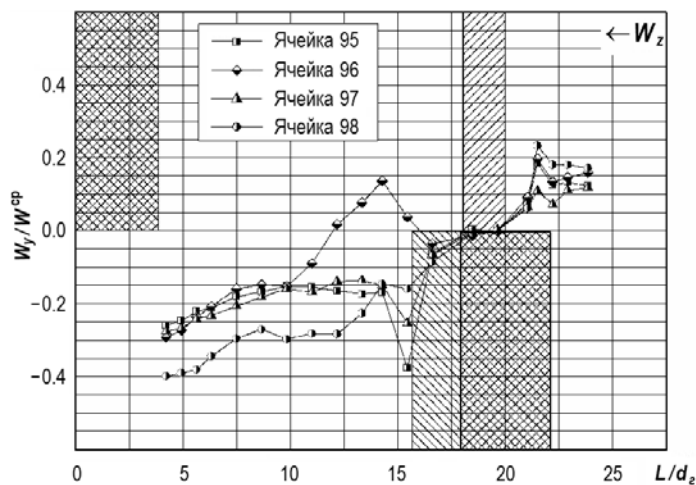


Рис. 8. Распределение относительной поперечной скорости в ряду твэлов ТВСА-Т, прилежащих к межкассетному пространству

4. На формирование потока теплоносителя за ПР ТВСА-12 PLUS помимо поперечного потока, вызванного обтеканием ДР, оказывает влияние расположение дефлекторов ПР. В зазорах между твэлами ТВСА-12 PLUS, прилежащих к межкассетному пространству, где дефлектор направлен в сторону межкассетного пространства, поперечная скорость (W_y/W^{cp}) составляет 50% от среднерасходной скорости, а в зазорах между твэлами, где дефлектор направлен в сторону кассеты ТВСА-12 PLUS, 30% от среднерасходной скорости (см. рис. 7).

5. В зазорах между твэлами ТВСА-Т, прилежащими к межкассетному пространству, непосредственно перед КДР реализуется поперечный поток теплоносителя, движущийся в ТВСА-12 PLUS, а перед ДР ТВСА-12 PLUS, наоборот, в ТВСА-Т. Поперечная скорость (W_y/W^{cp})

перед КДР составляет 20%, а перед ДР 30% от среднерасходной скорости (рис. 8).

6. Глубина распространения возмущений потока теплоносителя в ТВСА-12 PLUS и ТВСА-Т при обтекании КДР ограничивается четырьмя крайними рядами твэлов, а при обтекании ДР – третьим рядом твэлов каждой из кассет, что свидетельствует об интенсивном межкассетном взаимодействии между соседними кассетами ТВСА.

7. Конструкция ПР ТВСА-12 PLUS предусматривает два варианта взаимного расположения дефлектора и зубчатого края обода ПР, организующих течение потока теплоносителя: противоположное расположение дефлектора и зубчатого края обода ПР и сонаправленное расположение дефлектора и зубчатого края обода ПР.

Анализ распределения расходов теплоносителя позволил заключить, что в областях 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 – увеличение расхода теплоносителя на 10%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные экспериментальные данные позволили детализировать картину обтекания потоком теплоносителя дистанционирующих и перемешивающих решеток ТВСА и сделать следующие выводы.

1. Максимальное значение поперечной составляющей вектора скорости (около 40 – 50 % от среднерасходной скорости) реализуется в зазорах между твэлами ТВСА-Т и ТВСА-12 PLUS, прилежащими к межкассетному пространству.

2. В области межкассетного пространства ТВСА-Т и ТВСА-12 PLUS значение поперечной составляющей вектора скорости не превышает 30% от среднерасходной скорости.

3. Распространение возмущений потока теплоносителя в ТВСА-Т и ТВСА-12 PLUS ограничивается четырьмя периферийными рядами твэлов, что говорит о высокой интенсивности перераспределения потока теплоносителя между соседними кассетами.

4. Уменьшение расхода теплоносителя на 10% наблюдается в областях кассеты ТВСА-12 PLUS с противоположным расположением дефлектора и зубчатого края обода ПР, а в областях с сонаправленным расположением дефлектора и зубчатого края обода ПР наблюдается увеличение расхода теплоносителя на 10%.

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

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).

Поступила в редакцию 21.07.2015 г.

Литература

1. Дмитриев С.М., Зверев Д.Л., Бых О.А., Панов Ю.К., Сорокин Н.М., Фарафонов В.А. Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах: учебник. – М.: Машиностроение. – 2013.
2. Баринев А.А., Бородин В.Е., Дмитриев С.М., Хробостов А.Е. К вопросу о методологии обоснования теплотехнической надежности активных зон водяных энергетических реакторов / Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2014. - №2. – С. 98-108.
3. Дмитриев С.М., Бородин С.С., Легчанов М.А., Солнцев Д.Н., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е. Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик по-

тока теплоносителя в ТВСА ВВЭР // Атомная энергия. - 2012. - Т. 113. - Вып. 5. - С. 252-257.

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

5. Дмитриев С.М., Бородин С.С., Легчанов М.А., Солнцев Д.Н., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е. Особенности локальной гидродинамики и массообмена теплоносителя в ТВС реакторов ВВЭР и PWR с перемешивающими решетками // Тепловые процессы в технике. -Т. 5. - Вып. 3. -М.: Наука и Технологии. - 2013. - С. 98-107.

Авторы

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

E-mail: dmitriev@nntu.nnov.ru

Доронков Денис Владимирович, аспирант

E-mail: nevid000@mail.ru

Полозкова Екатерина Николаевна, магистрант

E-mail: Polozkova-Ekaterina@yandex.ru

Пронин Алексей Николаевич, аспирант

E-mail: proninaleksei@mail.ru

Сорокин Владислав Дмитриевич, ассистент

E-mail: vlad.sorokin1987@mail.ru

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

E-mail: khrobostov@nntu.nnov.ru

UDC 621.039

RESEARCHES OF HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF COOLANT IN VVER-1000 REACTOR MIXED CORE OF ATOMIC POWER STATION «TEMELIN»

Dmitriev S.M., Doronkov D.V., Polozkova E.N., Pronin A.N.,

Sorokin V.D., Khrobostov A.E.

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

603950, Nizhny Novgorod, Minin Str. 24

ABSTRACT

Results of researches of interassembly interaction of coolant flow in VVER-1000 core of Atomic Power Station «Temelin». Study of coolant flow process in fuel element bundle FA has been carried out on an aerodynamic experimental rig. VVER-1000 core fragment which consists of FA-12 PLUS and FA-T with stiffening angles and interassembly gap has been chosen as a model to receive more detailed information on hydrodynamic characteristics of coolant flow. Investigations of hydrodynamic characteristics of coolant have been consisted in measuring coolant flow velocity vector as in characteristic zones areas of FA, as in interassembly gap by means of the five-channel pneumometric probe. An analysis of spatial distribution of absolute velocity flow projections allowed to specificate pattern (picture) of flow-past spacer and mixing grids and combined spacer grids of FA, to determine realization zones of maximum cross-flow of coolant, depth of disturbance passage and redistribution of coolant rate in neighboring assemblies of FA. Investigation results of interassembly interaction of coolant between neighboring FAs are used in Afrikantov OKBM JSC to specify methods of hydraulic design VVER-1000 cores and have been included in a data-base for verifying

CFD codes (Computation Fluid Dynamics) and for detailed cell-wise calculation VVER-1000 reactor cores.

Keywords: core, FA, spacer and mixing grids, interassembly interaction, coolant hydrodynamics.

REFERENCES

1. Dmitriev S.M., Zverev D.L., Byh O.A., Panov Ju.K., Sorokin N.M., Farafonov V.A. Osnovnoe oborudovanie AEHS s korpusnymi reaktorami na teplovyh nejtronah: uchebnik [The main equipment of nuclear power plants with a tank reactor with thermal neutrons]. Moscow. Mashinostroenie Publ., 2013 (in Russian).
2. Barinov A.A., Borodina V.E., Dmitriev S.M., Hrobostov A.E. K voprosu o metodologii obosnovaniya teplotekhnicheskoy nadezhnosti aktivnyh zon vodyanyh 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., Borodin S.S., Legchanov M.A., Solncev D.N., Sorokin V.D., Hrobostov A.E. Eksperimental'nye 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 (5), pp. 252-257 (in Russian).
4. Dmitriev S.M., Varencov A.V., Dobrov A.A., Doronkov D.V., Samojlov O.B., Sorokin V.D., Hrobostov A.E. Raschyotno-eksperimental'nye issledovaniya lokal'noj gidrodinamiki i massoobmena potoka teplonositelya v TVS-Kvadrat reaktorov PWR s peremeshivayuschimi reshyotkami [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).
5. Dmitriev S.M., Borodin S.S., Legchanov M.A., Solncev D.N., Sorokin V.D., Hrobostov A.E. Osobennosti lokal'noj gidrodinamiki i massoobmena teplonositelya v TVS reaktorov VVEHR i PWR s peremeshivayushchimi reshyotkami [Features of local hydrodynamics and mass exchange of the heat-carrier in fuel rod assemblies of VVER and PWR with mixing grids]. *Teplovye processy v tekhnike*. Moscow. Nauka i Tekhnologii Publ. 2013, v. 5 (3), pp. 98-107.

Authors

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

E-mail: dmitriev@nntu.nnov.ru

Doronkov Denis Vladimirovich, PhD Student

E-mail: nevid000@mail.ru

Polozkova Ekaterina Nikolaevna, Master Student

E-mail: Polozkova-Ekaterina@yandex.ru

Pronin Aleksej Nikolaevich, PhD Student

E-mail: proninaleksei@mail.ru

Sorokin Vladislav Dmitriyevich, Assistant

E-mail: vlad.sorokin1987@mail.ru

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

E-mail: hrobostov@nntu.nnov.ru