

## ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 621.039

**В.Е. Бородина, А.В. Варенцов, Д.В. Доронков, М.А. Легчанов,  
Е.Н. Полозкова, А.Н. Пронин, Д.Н. Солнцев, В.Д. Сорокин**

### **ИССЛЕДОВАНИЯ МЕЖКАССЕТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА ВВЭР АЭС «ТЕМЕЛИН» С РАЗЛИЧНЫМИ КОНСТРУКЦИЯМИ ТВСА**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты экспериментальных исследований межкассетного взаимодействия теплоносителя в смешанной активной зоне реактора ВВЭР, состоящей из ТВСА–Т и ТВСА–12 PLUS. Исследования проводились на аэродинамическом стенде с измерением локальных полей скорости пятиканальным пневмометрическим зондом. Анализ пространственного распределения проекций абсолютной скорости потока позволил детализировать картину обтекания дистанционирующих и перемешивающих решеток ТВСА потоком теплоносителя. Результаты исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя между соседними ТВСА–Т и ТВСА–12 PLUS приняты для практического использования в АО «ОКБМ Африкантов» при оценке теплотехнической надежности активных зон реакторов ВВЭР и включены в базу данных для верификации программ вычислительной гидродинамики (CFD кодов) и детального поэлементного расчета активной зоны реакторов ВВЭР.

*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 совершенствования поставляемого оборудования, в том числе оптимизации конструкции тепловыделяющихборок (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 ячеистой 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» [2].

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 [3].

### 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 [4].

Во время работы стенда воздух посредством вентилятора высокого давления нагнетается в ресиверную емкость, далее проходит успокоительный участок, ЭМ и выбрасывается в атмосферу. Исследования локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя внутри трубного пучка ЭМ заключались в измерении модуля вектора скорости, углов набегания потока и статического давления [5].

Экспериментальная модель представляет собой фрагмент активной зоны реактора ВВЭР, включающий в себя сегменты кассет ТВСА–12 PLUS и ТВСА–Т с межкассетным пространством и выполнена с соблюдением полного геометрического подобия. Пояс ПР ТВСА–12 PLUS имеет турбулизирующие дефлекторы, расположенные по схеме «порядная прогонка». Пояс КДР ТВСА–Т снабжен турбулизирующими дефлекторами, расположенными по схеме «закрутка вокруг твэла».

### Измерительный комплекс

В состав измерительного комплекса входят: пятиканальный пневмометрический зонд, блок аналоговых преобразователей давления, 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 составляет  $\pm 0,25\%$ .

### Обоснование представительности экспериментальных исследований

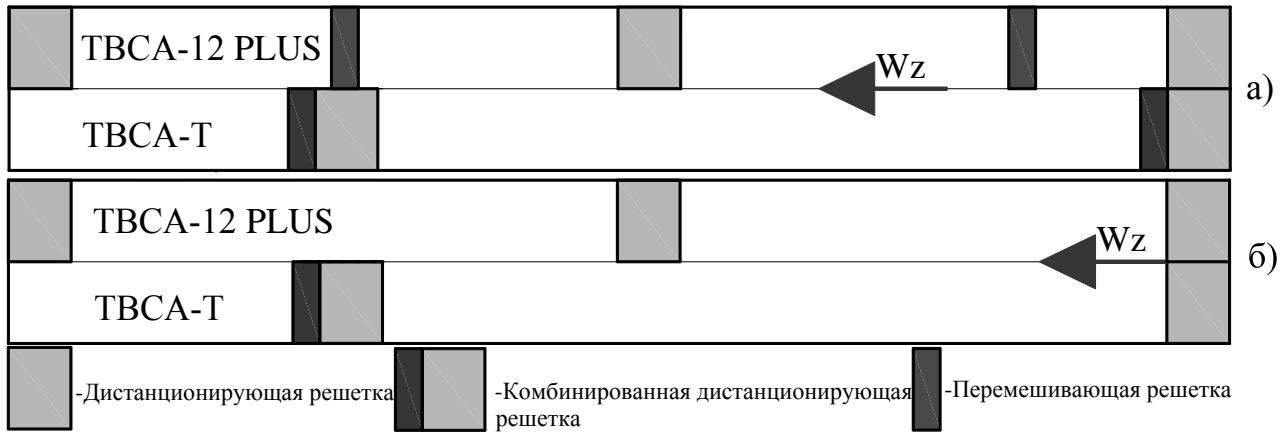
Важным этапом проведения экспериментальных исследований является подтверждение их представительности. Поскольку моделирование течения водяного теплоносителя осуществляется воздухом, то на основе теории подобия, можно утверждать, что в области автомодельности профиль относительной скорости остается практически 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. По полученным результатам область автомодельного течения в ЭМ начинается при числе Рейнольдса равном 55000, а все исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя проводились при числе Рейнольдса равном 80000 на участке стабилизированного автомодельного течения теплоносителя. Были определены значения коэффициентов местного гидравлического сопротивления дистанционирующих, перемешивающих и комбинированных дистанционирующих решеток, которые соответствуют значениям сопротивления натуральных ДР, ПР и КДР штатных ТВСА. Также была произведена оценка точности полученных опытных результатов исследований.

### Методика проведения исследований

Исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя между соседними ТВСА проводились на ЭМ фрагмента активной зоны реактора ВВЭР, состоящего из двух сегментов ТВСА–12 PLUS и одного сегмента ТВСА–Т и ЭМ состоящей из трех сегментов ТВСА–12 PLUS.

Экспериментальные исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя

между соседними ТВСА–12 PLUS и ТВСА–Т заключались в измерении локальных полей скорости пятиканальным пневмометрическим зондом. Вектор скорости измерялся в характерной области межкассетного зазора ЭМ с расположением ДР, ПР и КДР, которое соответствует верхнему и нижнему фрагментам твэльного пучка штатных ТВС (рис. 1).

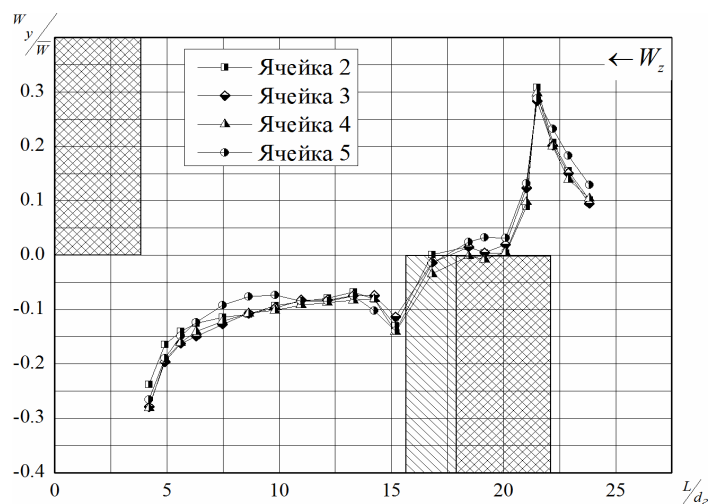


**Рис. 1. Схема расположения ПР, ДР и КДР в ЭМ:**  
 а – верхний фрагмент твэльного пучка ТВСА;  
 б – нижний фрагмент твэльного пучка ТВСА

### Результаты исследований межкассетного взаимодействия теплоносителя в нижнем фрагменте твэльного пучка ТВСА–Т и ТВСА–12 PLUS

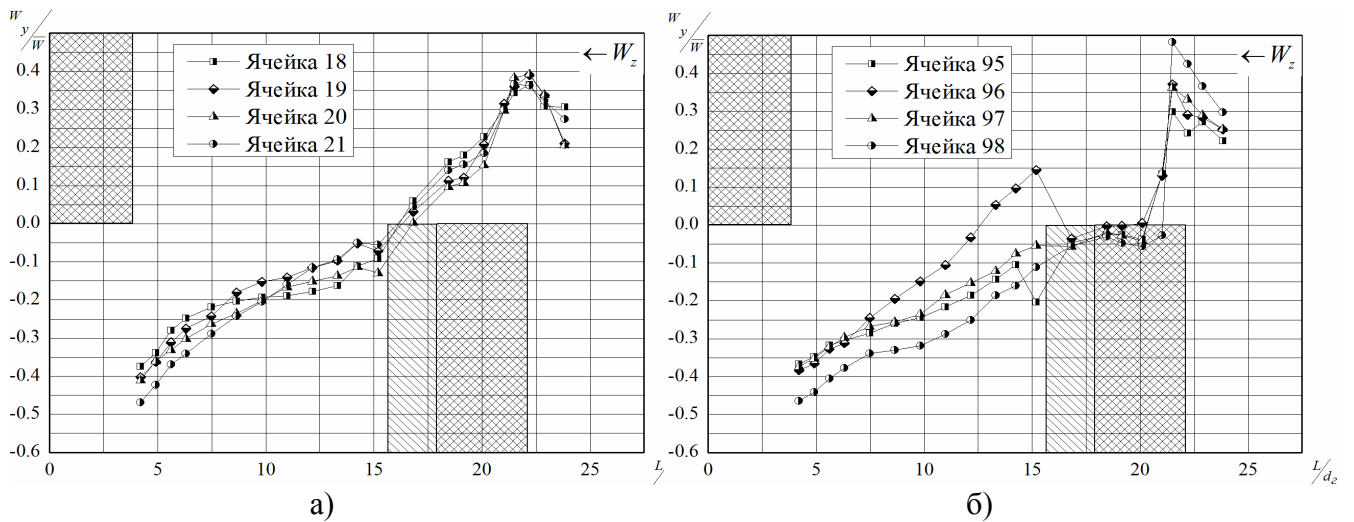
Анализ результатов экспериментальных исследований позволил заключить:

1. В области межкассетного пространства ЭМ перед КДР ТВСА–Т поперечный поток движется в ТВСА–12 PLUS, а перед ДР ТВСА–12 PLUS наоборот. Значение поперечной составляющей вектора скорости ( $W_y / \bar{W}$ ) перед КДР и ДР соответствующих кассет одинаково и составляет 30% от среднерасходной скорости (рис. 2).



**Рис. 2. Распределение относительной поперечной скорости в межкассетном пространстве**

2. В зазорах между твэлами, прилежащими к межкассетному пространству, реализуется максимальный на данном фрагменте твэльного пучка ТВС поперечный поток теплоносителя. Поперечная составляющая вектора скорости ( $W_y / \bar{W}$ ) перед КДР и ДР составляет 40% от среднерасходной скорости (рис. 3, а, б).

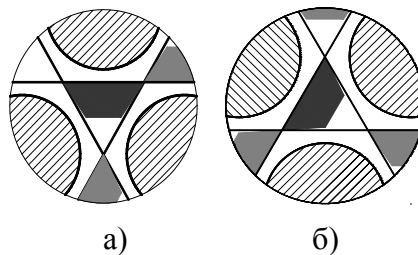


**Рис. 3. Распределение относительной поперечной скорости в ряду твэлов, прилежащем к межкассетному пространству:**  
*а* – ТВСА–12 PLUS; *б* – ТВСА–Т

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 твэльного пучка ТВСА–12 PLUS и ТВСА–Т является применение в ТВСА–12 PLUS перемешивающей решетки, конструкция которой предусматривает следующие варианты расположения дефлекторов, представленные на рис. 4.



**Рис. 4. Расположение дефлектора ПР в ячейке ТВСА–12 PLUS:**  
*а* – дефлектор направлен вниз; *б* – дефлектор направлен вбок

Анализ полученных экспериментальных данных позволил выявить влияние перемешивающей решетки на межкассетное взаимодействие теплоносителя и заключить следующее:

1. Перед КДР ТВСА–Т поперечный поток движется в ТВСА–12 PLUS, а перед ПР и ДР ТВСА–12 PLUS наоборот. Значение поперечной составляющей вектора скорости ( $W_y / \bar{W}$ ) в области межкассетного пространства перед КДР и ПР составляет 30% от средне-расходной скорости (рис. 5).

2. В областях межкассетного пространства, граничащих с ячейками ТВСА–12 PLUS, где дефлектор направлен вниз, значение поперечной составляющей вектора скорости

$(W_y / \bar{W})$  достигает 30% от среднерасходной скорости, а в областях, граничащих с ячейками, где дефлектор направлен вбок, 15% от среднерасходной скорости (рис. 5).

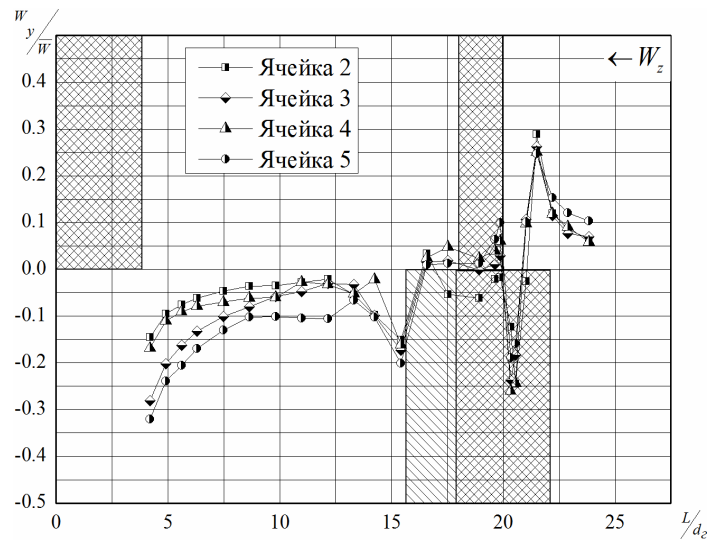


Рис. 5. Распределение относительной поперечной скорости в межкассетном пространстве

3. В зазорах между твэлами ТВСА–12 PLUS, прилежащими к межкассетному пространству, реализуется поперечный поток теплоносителя, который вызван обтеканием КДР ТВСА–Т. Значение поперечной составляющей вектора скорости  $(W_y / \bar{W})$  перед КДР составляет 50% от среднерасходной скорости (рис. 6, а, б).

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 вниз, поперечная составляющая вектора скорости  $(W_y / \bar{W})$  составляет 50% от среднерасходной скорости, а в зазорах между твэлами, где дефлектор направлен вбок, 30% от среднерасходной скорости (рис. 6, а, б).

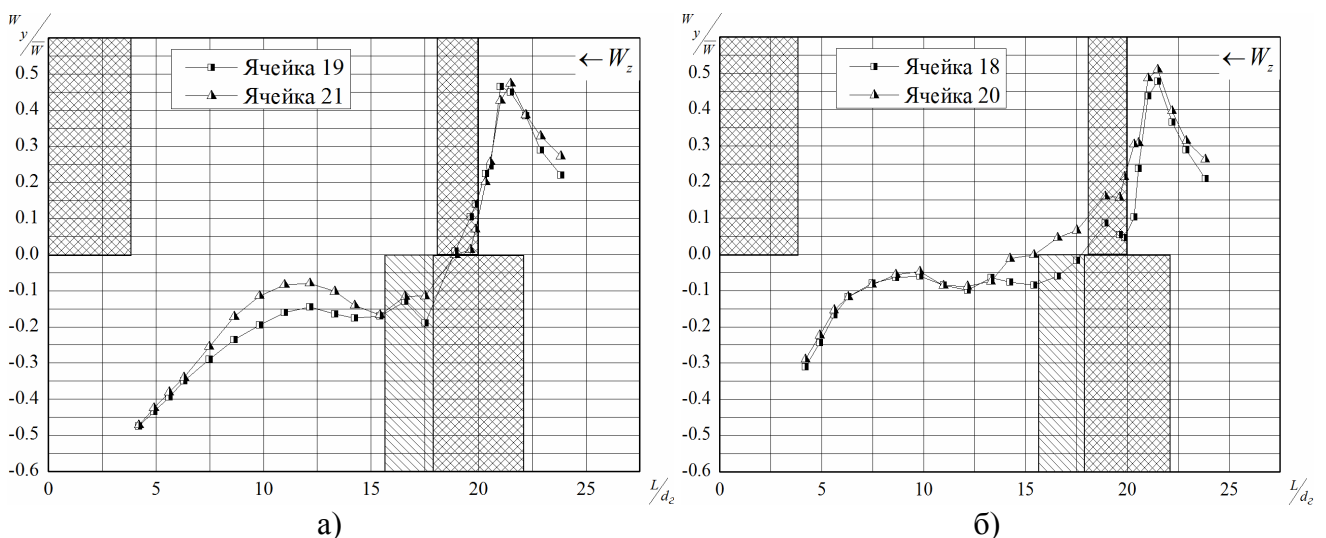
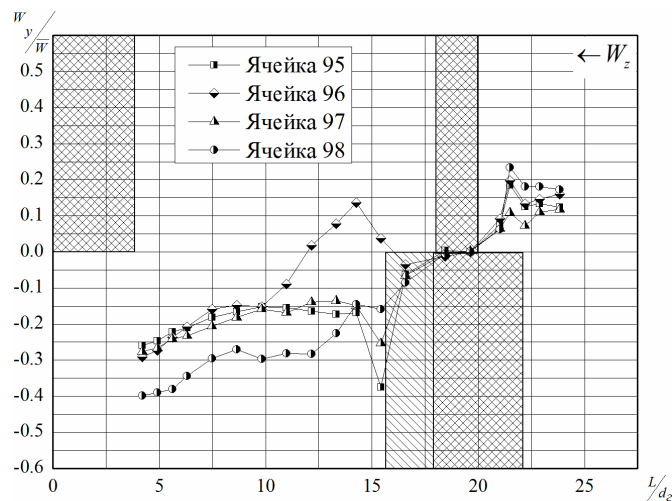


Рис. 6. Распределение относительной поперечной скорости в зазорах между твэлами ТВСА–12 PLUS, прилежащих к межкассетному пространству: а – зазор, где дефлектор направлен вниз; б – зазор, где дефлектор направлен вбок

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. Поперечная составляющая вектора скорости ( $W_y / \bar{W}$ ) перед КДР составляет 20% от среднерасходной скорости, а перед ДР – 30% от среднерасходной скорости (рис. 7).



**Рис. 7. Распределение относительной поперечной скорости в ряду твэлов ТВСА–Т, прилежащем к межкассетному пространству**

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 взаимодействии между соседними кассетами ТВСА.

### Заключение

На основе комплексного анализа экспериментальных данных по исследованию межкассетного взаимодействия теплоносителя между соседними ТВСА–Т и ТВСА–12 PLUS сделаны следующие выводы:

1. В области межкассетного пространства нижнего фрагмента твэльного пучка ТВСА–Т и ТВСА–12 PLUS перед КДР ТВСА–Т поперечный поток движется в ТВСА–12 PLUS, а перед ДР ТВСА–12 PLUS наоборот. Максимальное значение поперечной составляющей вектора скорости составляет 30% от среднерасходной скорости.

2. В зонах межкассетного пространства верхнего фрагмента твэльного пучка ТВСА–Т и ТВСА–12 PLUS, граничащих с ячейками ТВСА–12 PLUS, где дефлектор ПР направлен вниз, поперечная составляющая вектора скорости составляет 30% от среднерасходной скорости, а в зонах, граничащих с ячейками, где дефлектор ПР направлен вбок, 15% от среднерасходной скорости.

3. Максимальное значение поперечной составляющей вектора скорости в нижнем и верхнем фрагментах твэльного пучка ТВСА–Т и ТВСА–12 PLUS реализуется в зазорах между твэлами, прилежащих к межкассетному пространству. Значение поперечной составляющей вектора скорости составляет (40–50) % от среднерасходной скорости.

4. Распространение возмущений потока теплоносителя в нижнем и верхнем фрагментах активной части ТВСА–Т и ТВСА–12 PLUS ограничивается четырьмя крайними рядами твэлов. Данный факт говорит о высокой интенсивности перераспределения потока теплоносителя между соседними ТВСА.

Результаты исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя между соседними ТВСА–Т и ТВСА–12 PLUS приняты для практического использования в АО

«ОКБМ Африкантов» при оценке теплотехнической надежности активных зон реакторов ВВЭР и включены в базу данных для верификации программ вычислительной гидродинамики (CFD кодов) и детального поячеечного расчета активной зоны реакторов ВВЭР.

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. **Дмитриев, С.М.** Основное оборудование АЭС / С.М. Дмитриев [и др.]. – Минск: Вышэйшая школа. – 2015.
2. **Дмитриев, С.М.** Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах / С.М. Дмитриев [и др.]. – М.: Машиностроение. – 2013.
3. **Баринов, А.А.** К вопросу о методологии обоснования теплотехнической надежности активных зон водяных энергетических реакторов / А.А. Баринов [и др.] // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2014. №2. С. 98–108.
4. **Бородин, С.С.** Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР / С.С. Бородин [и др.] // Атомная энергия. 2012. Т. 113. Вып. 5. С. 252–257.
5. Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в ТВС-Квадрат реакторов PWR с перемешивающими решетками / А.В. Варенцов [и др.] // Теплоэнергетика. 2014. №8. С. 20–27.

*Дата поступления  
в редакцию 29.04.2015*

**V.E. Borodina, A.V. Varentsov, D.V. Doronkov, M.A. Legchanov, E.N. Polozkova,  
A.N. Pronin, D.N. Solntsev, V.D. Sorokin**

### RESEARCHES OF INTERASSEMBLY INTERACTION OF COOLANT IN WWER REACTOR CORE OF ATOMIC POWER STATION “TEMELIN” WITH VARIOUS CONSTRUCTIONS TVSA

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

**Purpose:** The main aim of research was to expose characteristics of interassembly interaction of coolant flow between neighbouring TVSA-12 PLUS and TVSA-T of WWER reactor core.

**Design/methodology/approach:** The main method of hydrodynamics in the nuclear reactor FA investigation is an experimental research of scale cassette model and active zones of aero- and hydrodynamics stands. The local hydrodynamic characteristics of coolant flow have been conducted into a bunch of fuel rods of model. These researches consisted in measurement of velocity vector module, total pressure and static pressure. Measurement have been carried out by means of fivechannel pneumatic probe. Velocity vector was measured in characteristics zones both of FA and of interassembly gap of a core WWER-1000.

**Findings:** Experimental researches of heat carrier’s hydrodynamics and mass transfer in the experimental model were organized. The features of interassembly interaction of coolant flow between TVSA-12 PLUS and TVSA-T fuel assemblies were revealed.

**Research limitations/implications:** The obtained experimental information has been generalized, and a data bank for verifying CDF codes and computer programs for cell-wise calculations for reactor cores with FA has been established. Investigations results are used to specify local hydrodynamics and mass transfer characteristics of coolant flow when assessing heat engineering reliability of WWER reactor core.

**Originality/value:** Topically of this article is in heat carrier mass transfer research in the nuclear reactor FA to physical laws. Therefore we can prove heat engineering reliability of the WWER-1000 reactor active zone.

*Key words:* core, fuel assembly, spacing grid, mixing grid, interassembly interaction, hydrodynamic of coolant.