

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-6-591-603

УДК 621.039

Экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена теплоносителя в тепловыделяющих сборках реакторных установок с водой под давлением

С. М. Дмитриев¹⁾, А. А. Баринев¹⁾, А. Н. Пронин¹⁾, В. Д. Сорокин¹⁾,
А. Е. Хробостов¹⁾

¹⁾Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева
(Нижний Новгород, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Представлены результаты экспериментальных исследований локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя за различными вариантами конструкций дистанционирующих и перемешивающих решеток, разработанных для топливных кассет отечественных и зарубежных ядерных реакторов. Для проведения исследований изготовлены модели следующих топливных кассет: ТВСА для реакторов ВВЭР и ВБЭР, ТВС-КВАДРАТ для реакторов PWR и ТВС реактора КЛТ-40С. Все модели выполнены в полном геометрическом подобии с натурными кассетами. Исследования проводили путем моделирования течения теплоносителя в активной зоне воздухом на аэродинамическом стенде. Для измерения локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя использовали специальные пневмометрические датчики, позволяющие измерять полный вектор скорости в точке по трем его компонентам. Для изучения процессов массообмена использовали метод пропанового трассера. При проведении исследований гидродинамики потока измеряли поперечные скорости потока теплоносителя, расходы теплоносителя по ячейкам модели. Исследование массообменных процессов заключалось в изучении распределения концентрации трассера в экспериментальной модели, определении длин затухания массообменных процессов за перемешивающими решетками, расчете коэффициентов межячейкового массообмена. Накопленная база данных по течению теплоносителя в тепловыделяющих сборках для реакторов различных типов легла в основу инженерного обоснования конструкций активных зон. Рекомендации по выбору оптимальных вариантов конструкции перемешивающих решеток учитывались конструкторами АО «ОКБМ Африкантов» при создании вводимых в эксплуатацию тепловыделяющих сборок. Результаты исследований используются для верификации CFD-кодов и программ детального поячеечного расчета активных зон с целью уменьшения консерватизма при обосновании теплотехнической надежности.

Ключевые слова: гидродинамика, массообмен, теплоноситель, реакторная установка, перемешивающие решетки

Для цитирования: Экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена теплоносителя в тепловыделяющих сборках реакторных установок с водой под давлением / С. М. Дмитриев [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 6. С. 591–603

Адрес для переписки
Дмитриев Сергей Михайлович
Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева
ул. Минина, 24,
603155, г. Нижний Новгород,
Российская Федерация
Тел.: +7 831 436-23-25
dmitriev@nntu.nnov.ru

Address for correspondence
Dmitriev Sergey M.
Nizhny Novgorod State Technical
University named after R. E. Alekseev
24 Minin str.,
603155, Nizhny Novgorod,
Russian Federation
Tel.: +7 831 436-23-25
dmitriev@nntu.nnov.ru

Experimental Study of Local Hydrodynamics and Mass Exchange Processes of Coolant in Fuel Assemblies of Pressurized Water Reactors

S. M. Dmitriev¹⁾, A. A. Barinov¹⁾, A. N. Pronin¹⁾, V. D. Sorokin¹⁾, A. E. Khrobostov¹⁾

¹⁾Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev
(Nizhny Novgorod, Russian Federation)

Abstract. The results of experimental studies of local hydrodynamics and mass exchange of coolant flow behind spacer and mixing grids of different structural versions that were developed for fuel assemblies of domestic and foreign nuclear reactors are presented in the article. In order to carry out the study the models of the following fuel assemblies have been fabricated: FA for VVER and VBER, FA-KVADRAT for PWR-reactor and FA for KLT-40C reactor. All the models have been fabricated with a full geometrical similarity with full-scale fuel assemblies. The study was carried out by simulating the flow of coolant in a core by air on an aerodynamic test rig. In order to measure local hydrodynamic characteristics of coolant flow five-channel Pitot probes were used that enable to measure the velocity vector in a point by its three components. The tracer-propane method was used for studying mass transfer processes. Flow hydrodynamics was studied by measuring cross-section velocities of coolant flow and coolant rates according to the model cells. The investigation of mass exchange processes consisted of a study of concentration distribution for tracer in experimental model, in determination of attenuation lengths of mass transfer processes behind mixing grids, in calculating of inter-cellular mass exchange coefficient. The database on coolant flow in fuel assemblies for different types of reactors had been accumulated that formed the basis of the engineering substantiation of reactor cores designs. The recommendations on choice of optimal versions of mixing grids have been taken into consideration by implementers of the JSC "OKBM Afrikantov" when creating commissioned fuel assemblies. The results of the study are used for verification of CFD-codes and CFD programs of detailed cell-by-cell calculation of reactor cores in order to decrease conservatism for substantiation of thermal-mechanical reliability.

Keywords: hydrodynamics, mass transfer, coolant, reactor, mixing grids

For citation: Dmitriev S. M., Barinov A. A., Pronin A. N., Sorokin V. D., Khrobostov A. E. (2016) Experimental Study of Local Hydrodynamics and Mass Exchange Processes of Coolant in Fuel Assemblies of Pressurized Water Reactors. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (6), 591–603 (in Russian)

Введение

Уровень развития современного реакторостроения в значительной мере зависит от изучения гидродинамики и тепломассообмена теплоносителя в активной зоне (АЗ) ядерного реактора. Необходимость знания процессов тепломассообмена и гидродинамики определяется тем, что ядерные реакторы представляют собой высокоэнергонапряженные аппараты, в которых данные процессы проявляются в весьма сложной форме. С одной стороны, принятие существенных запасов по параметрам теплоносителя ограничивает как мощность, так и КПД ядерно-энергетической установки в целом, что нецелесообразно с экономической точки зрения. С другой стороны, превышение локальных параметров теплоносителя (теплового потока, температуры, энтальпии) в АЗ сверх допустимых пределов может привести к выходу реактора из строя, что недопустимо с точки зрения безопасности [1].

Программы развития атомной энергетики ведущих стран мира предполагают использование реакторов с водой под давлением в качестве основы коммерческого парка ядерных установок. Реакторы данного типа работают в составе стационарных и транспортных реакторных установок (РУ), имеют огромную суммарную наработку и опыт успешной эксплуатации. Современные проекты таких реакторов сочетают отработанные, ставшие традиционными, технические решения с инновационными разработками. В последние годы РУ с водой под давлением переводятся на повышенные уровни мощности при одновременных нагрузках с уменьшенной утечкой нейтронов и более продолжительным топливным циклом. Задачи повышения мощности становятся актуальными и требуют улучшения теплогидравлических характеристик самих тепловыделяющих сборок (ТВС). Повышение мощности АЗ может обеспечиваться путем совершенствования конструкции дистанционирующих устройств. Улучшение теплогидравлических характеристик ТВС может быть достигнуто как размещением на дистанционирующих решетках (ДР) определенного количества конструктивных элементов (интенсификаторов теплосъема), так и использованием специально изготовленных перемешивающих решеток (ПР). В последнем случае функции дистанционирования на них могут и не возлагаться.

Современная проблематика совершенствования тепловыделяющих сборок

Важными задачами атомной энергетики РФ являются: повышение мощности и надежности работающих АЭС, создание первой в мире плавучей АЭС, выход на западный рынок ядерного топлива и др. Привнося значительный вклад в достижение поставленных целей, в ОАО «ОКБМ Африкантов» (РФ, г. Нижний Новгород) выполняются разработки ТВС для реакторов различных типов. Проведены обширные инженерные изыскания в отношении ТВС реакторов с водой под давлением отечественных и зарубежных проектов, результатом которых стало создание опытных и промышленных образцов топливных кассет. К таким кассетам относятся: ТВСА для реакторов ВВЭР и ВБЭР, ТВС КЛТ-40С для плавучей атомной станции, ТВС-КВАДРАТ для зарубежных реакторов типа PWR. Перечисленные топливные сборки имеют принципиальные конструктивные отличия от других типов ТВС аналогичного назначения, что позволяет получать более высокие эксплуатационные показатели, в том числе большую мощность АЗ при сохранении уровня теплотехнической надежности. Так, в ТВСА применен силовой уголкового каркаса, минимизирующий деформации пучка твэлов в процессе эксплуатации [2]. Для получения высокой интенсивности теплообмена в данной кассете предложено использовать два конструктивно различных типа решеток – «закрутка вокруг твэла» и «порядная прогонка» (рис. 1).

Применение подобных интенсификаторов в ТВСА позволяет выравнивать температуру (энтальпию) как по сечению, так и по высоте сборки,

а также повысить запасы до кризиса теплоотдачи. В связи с этим становится возможным увеличение тепловой мощности активной зоны. Опыт по созданию перемешивающих решеток был применен и в конструкции кассеты ТВС-КВАДРАТ, для которой разработаны свои типы перемешивающих и комбинированных перемешивающих ДР (рис. 2). Созданные ТВС данного типа не уступают по своим характеристикам зарубежным аналогам.

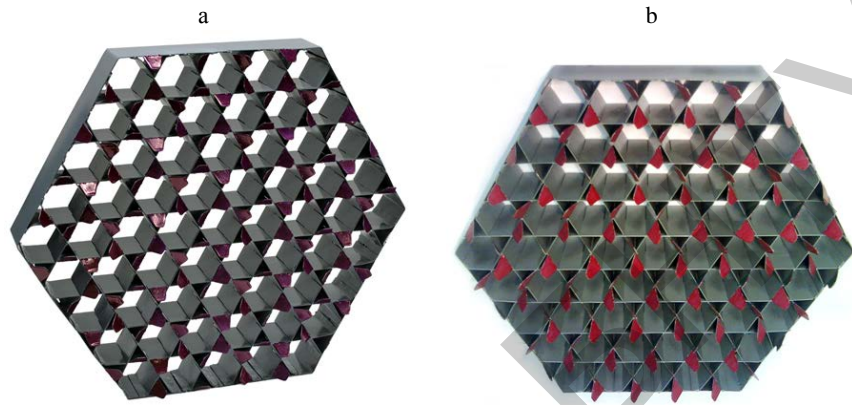


Рис. 1. Фрагменты перемешивающих решеток для ТВСА: а – перемешивающая решетка с дефлектором типа «закрутка вокруг твэла»; б – то же с дефлектором «порядная прогонка»

Fig. 1. Mixing grids fragments for FA: a – a mixing grid with a deflector of the “swirl around the fuel element” type; b – with a deflector of the “run row by row” type

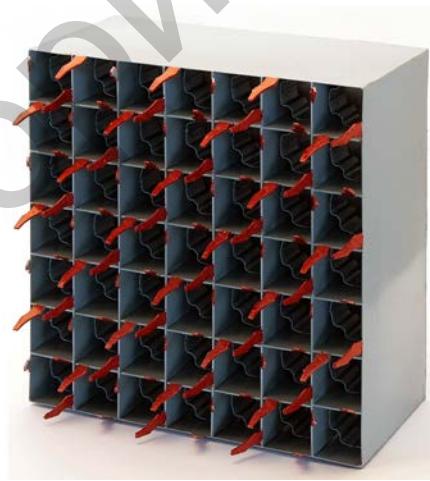


Рис. 2. Модель комбинированной перемешивающей дистанционирующей решетки ТВС-КВАДРАТ

Fig. 2. A model of the FA-KVADRAT combined mixing spacer grid

Особенностями чехловой кассеты реактора КЛТ-40С являются замена традиционных направляющих каналов органов регулирования на центральный шестигранный вытеснитель и применение пластинчатой ДР (рис. 3).

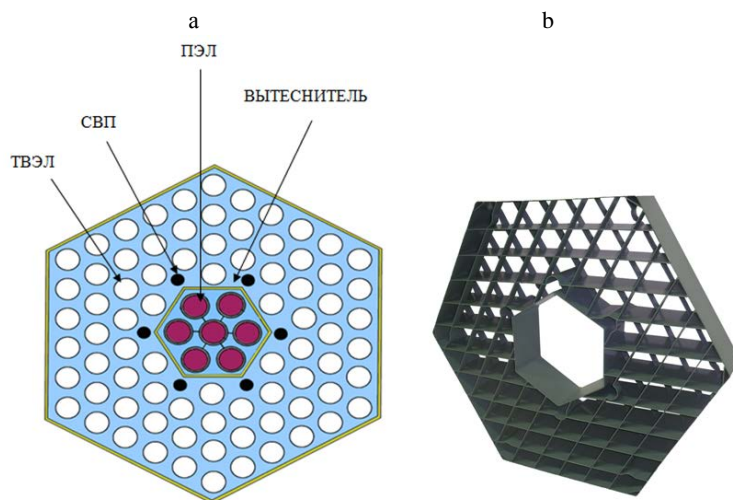


Рис. 3. Тепловыделяющие сборки для реакторных установок КЛТ-40С:
а – поперечное сечение ТВС; б – пояс дистанционирующей решетки

Fig. 3. Fuel assemblies for the KLT-40C reactor unit:
a – cross section of the FA; b – the spacer grid belt

Выбранная конструкция обеспечивает высокую жесткость, эксплуатационную надежность кассеты и ее соответствие всем требованиям, предъявляемым к современному ядерному топливу.

Экспериментальное обоснование теплогидравлики активных зон

Обоснование теплотехнической надежности АЗ ядерных реакторов во многом базируется на теплогидравлическом расчете [3], что в свою очередь требует большой информативности и высокой достоверности используемых параметров и значений локальных характеристик. Таким образом, надежный теплогидравлический расчет требует проведения значительного объема экспериментальных исследований и развития новых методов расчета локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока в ТВС. Оценка влияния перемешивающих устройств на критические тепловые потоки, определяющие уровень теплотехнической надежности, возможна только на теплофизических стендах при натуральных условиях течения теплоносителя. Однако изучение гидродинамики ТВС и АЗ в целом целесообразно проводить на масштабных и полноразмерных моделях кассет и активных зон на аэро- и гидродинамических стендах.

Для оценки влияния на поток теплоносителя различных типов решеток, устанавливаемых в вышеупомянутые реакторы, в базовой лаборатории реакторной гидродинамики Нижегородского государственного технического университета имени Р. Е. Алексеева (НГТУ) создан экспериментальный стенд, представляющий собой аэродинамический контур, через который прокачивается воздух (рис. 4).

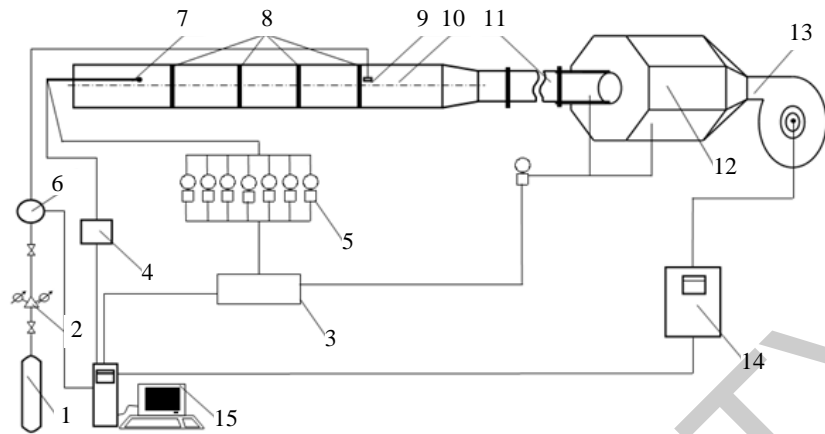


Рис. 4. Экспериментальный стенд НГТУ: 1 – газовый баллон; 2 – редуктор; 3 – базовый блок коммутации/измерения; 4 – модульный газоанализатор; 5 – преобразователи давления; 6 – регулятор расхода газа; 7 – отборный зонд; 8 – статические отборы; 9 – устройство ввода трассера в ячейку экспериментальной модели; 10 – экспериментальная модель; 11 – успокоительный участок; 12 – ресиверная емкость; 13 – вентилятор высокого давления; 14 – преобразователь частоты; 15 – ЭВМ

Fig. 4. The NSTU experimental test rig: 1 – gas cylinder; 2 – reducer; 3 – basic switching/measurement unit; 4 – modular gas analyzer; 5 – pressure transmitters; 6 – gas flow rate controller; 7 – selective probe; 8 – static selections; 9 – input of a tracer into a cell experimental model; 10 – experimental model; 11 – flow stabilization area; 12 – receiving reservoir; 13 – high-pressure fan; 14 – frequency converter; 15 – computer

Исследования локальных характеристик межъячеечного массообмена потока в экспериментальных моделях (ЭМ) ТВС проводили методом трассера. Принцип заключался в том, что поток воздуха посредством радиального вентилятора высокого давления поступал в ресиверную емкость, двигался через расходомерное устройство и успокоительный участок, а затем, пройдя через ЭМ, выбрасывался в атмосферу. Газ-трассер подавался через впускной зонд (рис. 5а) в характерную ячейку пучка твэлов в начале исследуемого участка и также выбрасывался в атмосферу вместе с газозвдушной смесью. При помощи капилляров или трубки Пито, используемой в качестве отборного зонда и линии транспортировки пробы газа, за исследуемым поясом перемешивающей решетки производили замер концентрации трассера по длине и сечению ЭМ (рис. 5).

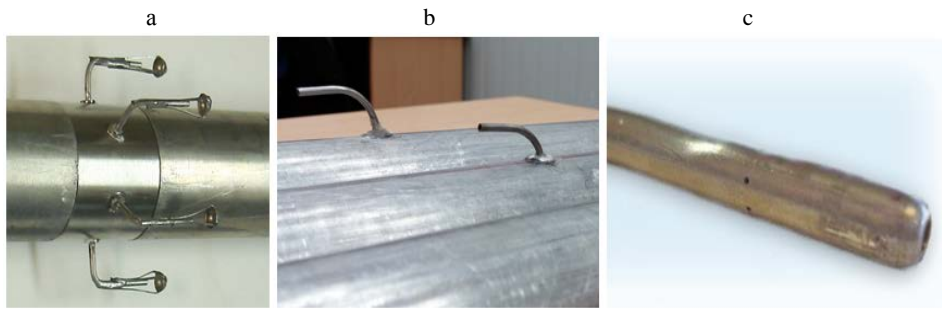


Рис. 5. Оснастка для проведения экспериментов по массообмену:
 а – впускные насадки; б – отборные капилляры; с – трубка Пито

Fig. 5. Equipment for carrying out experiments on mass exchange:
 a – intake nozzles; b – selecting capillaries; c – Pitot tube

Измерение полей скорости в ЭМ производили при помощи пневмометрического пятиканального зонда. Данным зондом (рис. 6) измеряли полный вектор скорости в точке по трем его компонентам путем измерения давлений в отверстиях чувствительной головки зонда и последующего пересчета по определенному алгоритму.

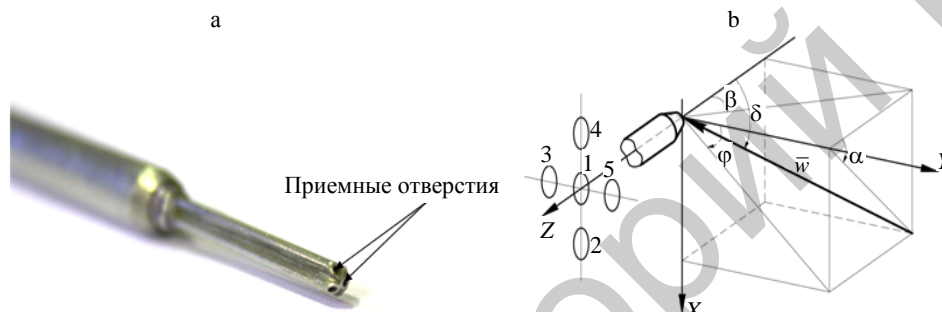


Рис. 6. Пневмометрический зонд (чувствительная часть):

а – внешний вид головки зонда; б – схема измерения компонент скорости

Fig. 6. Pneumometric probe (its sensitive part):

а – exterior view probe head; б – measurement diagram of the velocity component

Соответствие исследуемых процессов натурным основано на теории гидродинамического подобия, согласно которой модельные процессы подобны натурным при условии соблюдения определяющих критериев подобия. Для турбулентных течений в ограниченных затесненных каналах (каким и является течение в ТВС PWR) определяющим критерием является число Рейнольдса. Проведение экспериментальных исследований при числах Re , соответствующих режиму течения в штатных ТВС реактора, достаточно затруднительно, так как числа Re велики и достигают порядка 500000. Однако в соответствии с теорией подобия в зоне автомодельного течения форма безразмерных полей скорости $w_{лок}/\bar{w}$ остается практически неизменной на протяжении всей зоны автомодельности [4]. Таким образом, исследования, проведенные в зоне автомодельности течения, по-

зволяют в дальнейшем пересчитывать результаты на условия течения в натуральных сборках. На аэродинамическом стенде были также определены коэффициенты гидравлического сопротивления (КГС) всех исследуемых решеток. Соответствие КГС решеток в модельном эксперименте натурным значениям, а также проведение экспериментов на выполнение баланса расходов сред подтверждают представительность получаемых данных. Погрешности измерения концентрации газа-трассера не превышали 1,5 %, подача газа обеспечивалась редуктором с отклонениями 0,5 % массового расхода. Измерение давлений в каналах пневмометрических зондов осуществляли при помощи преобразователей избыточного давления с пределом допускаемой основной погрешности 0,25 %, погрешность получаемых проекций скорости не превышала 7,0 % ее абсолютного значения.

Результаты исследований течения в моделях кассеты ТВСА

Исследования локальных характеристик потока в ТВСА проводили на различных стержневых экспериментальных моделях, представляющих собой масштабные копии фрагментов активной зоны и сегментов кассет (рис. 7) [5–8]. 57-я и 94-я стержневые модели имитируют область АЗ на стыке соседних ТВС реакторов ВВЭР и ВБЭР, что дает возможность исследования межкассетных взаимодействий в потоке.

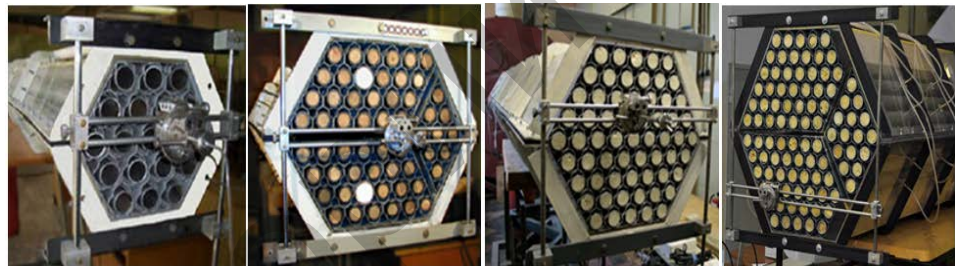


Рис. 7. Экспериментальные модели ТВСА

Fig. 7. FA experimental model

В ходе исследований определяли оптимальную конфигурацию установки ПР типа «порядная прогонка» и «закрутка вокруг твэла». По результатам комплексных исследований сделаны следующие выводы:

- экспериментально определены расходы через характерные ячейки модели;
- наличие дефлекторов приводит к возникновению направленного конвективного движения потока по направлению отгиба соответствующих дефлекторов и, как следствие, к появлению поперечных, постепенно затухающих составляющих скорости;
- изменение концентрации трассера в ячейках показывает, что не весь поток теплоносителя движется по направлению расположения дефлекторов. Часть трассера передается в соседние ячейки за счет турбулентного массообмена, имеющего значительно большую величину за ПР вследствие дополнительной турбулизации потока;

- определены длины затуханий возмущений массообменных процессов за ПР ($l/d \approx 14-16$, d – гидравлический диаметр модели);
- при последовательной постановке двух перемешивающих решеток типа «порядная прогонка» происходит более равномерное распределение концентрации трассера в поперечном сечении экспериментальной модели по сравнению с одной ПР типа «порядная прогонка» или ПР типа «закрутка вокруг твэла».

Результаты исследований течения в моделях кассеты ТВС-КВАДРАТ

Исследования в обоснование конструкций топлива ТВС-КВАДРАТ для зарубежных PWR проводили на 49-стержневой модели (рис. 8а) с установленными имитаторами НК и пластинчатых дистанционирующих решеток (ПДР) [8, 9]. Выбор оптимальной конструкции указанных ПДР осуществляли при различных вариантах типа дефлектора и угла его отгиба (рис. 8б).

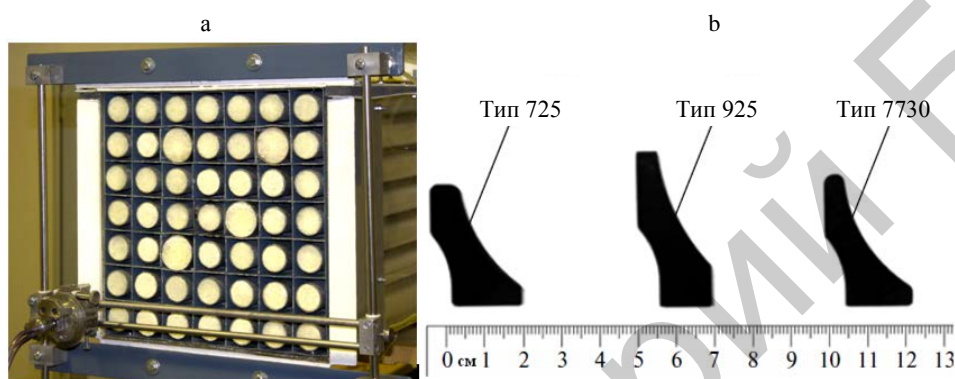


Рис. 8. Экспериментальная модель ТВС-КВАДРАТ: а – общий вид выхода модели; б – исследованные типы дефлекторов пластинчатых дистанционирующих решеток

Fig. 8. FA-KVADRAT experimental model: а – general view of the output of the model; б – examined types of plate spacer grid deflectors

Для количественной и качественной оценки закономерностей течения и влияния ПДР на поток теплоносителя строили графики изменения относительных скоростей потока по длине модели, графики и картограммы распределения газа-трассера. По результатам исследований установлено следующее:

- экспериментально установлено распределение расходов по характерным ячейкам ТВС, в том числе в области направляющих каналов;
- определены КГС ПДР различной конфигурации, оценена эффективность перемешивания теплоносителя при установке данных ПДР;
- установлено, что наилучшими (с точки зрения соотношения интенсивности перемешивания и гидравлического сопротивления) являются дефлекторы типа 925;
- наличие дефлекторов приводит к возникновению направленного движения потока (со скоростью, не превышающей 30 % расходной);

- затухание массообменных процессов происходит на расстояниях $25-27d_t$ за ПДР;
- эффективный коэффициент межъячейкового массообмена при установке выбранной ПДР в 5 раз больше, чем в гладком пучке твэл.

Результаты исследований течения в моделях тепловыделяющих сборок КЛТ-40С

Необходимость проведения детальных теплогидравлических расчетов в обоснование теплотехнической надежности ТВС для РУ КЛТ-40С обусловила постановку ряда экспериментальных исследований гидродинамики и массообмена [10–12]. Эксперименты проводили с использованием 18- и 84-стержневых моделей ТВС КЛТ-40С (рис. 9). Вследствие сложной геометрии пластинчатой ДР, в ТВС присутствуют 14 различных по затеснению проходного сечения типов ячеек, что создает существенную неравномерность расходов и коэффициентов межъячейкового массообмена.

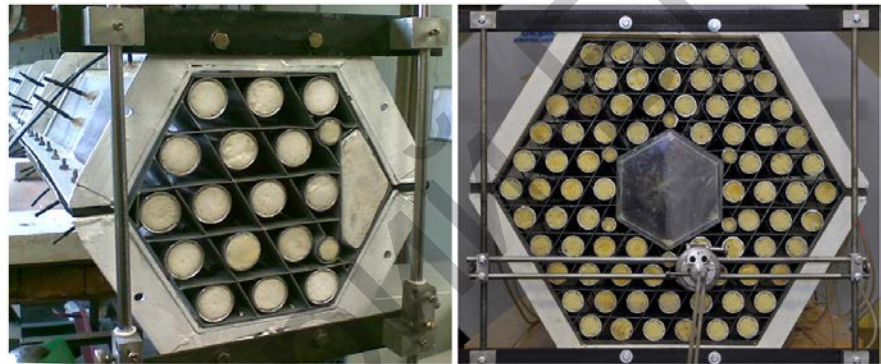


Рис. 9. Модели тепловыделяющих сборок КЛТ-40С

Fig. 9. FA KLT-40C experimental models

Для получения полной информации о трехмерном течении потока исследования проводили в трех характерных областях: стандартной (преимущественная часть ячеек) области вытеснителя и периферийной области (рис. 10). В результате обработки экспериментальных данных выявлены следующие особенности течения теплоносителя:

- во всех ячейках ТВС реактора КЛТ-40С поток теплоносителя носит осевой характер. Значения относительных поперечных скоростей (W_x / \bar{W}), (W_y / \bar{W}) не превышают 5 %;
- в стандартных ячейках области вытеснителя, где пластины ДР располагаются в виде «треугольника», расход теплоносителя на 10 % больше, чем через ячейки, где пластины ДР располагаются в виде «звезды» (рис. 11);
- в стандартных ячейках периферийной области через ячейки, где пластины ДР располагаются в виде «треугольника», расход теплоносителя

на 20 % больше, чем через ячейки, где пластины ДР располагаются в виде «звезды»;

- через ячейки области вытеснителя и периферийной области расход теплоносителя на (30–50) % меньше, чем через стандартные ячейки ТВС реактора КЛТ-40С.

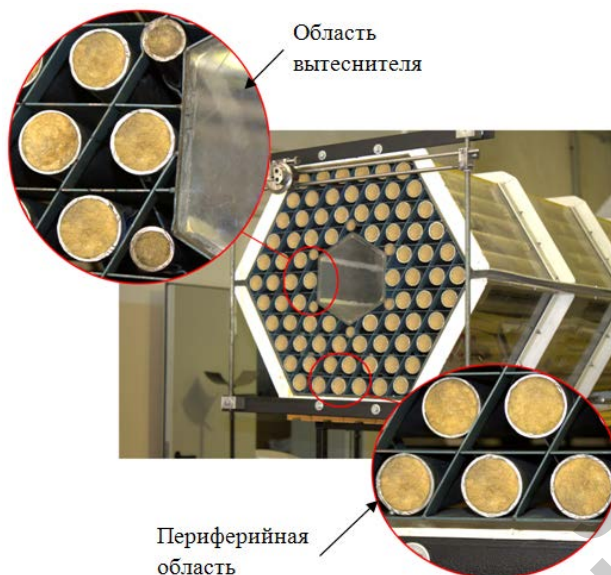


Рис. 10. Исследуемые области модели

Fig. 10. Model areas under investigation

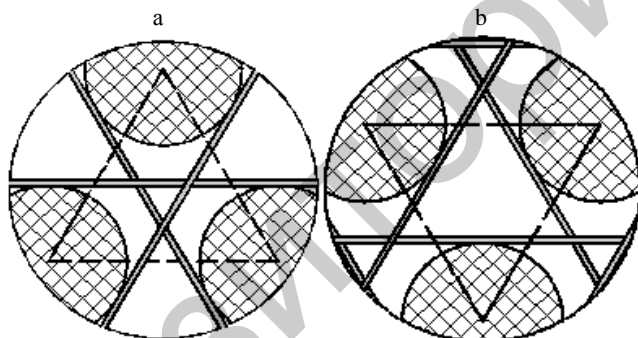


Рис. 11. Стандартные ячейки тепловыделяющих сборок:
а – тип затеснения «звезда»; б – тип затеснения «треугольник»

Fig. 11. Standard cells of fuel assemblies:
a – the “star” type of compressing; b – the “delta” of compressing

ВЫВОДЫ

1. В результате экспериментальных работ выявлены основные закономерности течения в топливных сборках различных конструкций. На основе исследований массообменных характеристик создан расчетный алгоритм, заложенный в программу для ЭВМ. Данная программа позволяет оценивать распределения концентрации, используя экспериментально получен-

ные поля скоростей. Анализ результатов работы программы показал, что предельные отклонения расчетных концентраций от экспериментальных составляет не более 10 %. Результаты расчетов были использованы для вычисления коэффициентов массообмена между определенными ячейками модели тепловыделяющих сборок КЛТ-40С, а также эффективного коэффициента перемешивания перемешивающих решеток для ТВСА реакторов ВВЭР-300, используемых при инженерных расчетах активной зоны в качестве замыкающих соотношений.

2. Накопленная база данных по течению теплоносителя в тепловыделяющих сборках для реакторов различных типов легла в основу инженерного обоснования конструкции активной зоны. Рекомендации по выбору оптимальных вариантов перемешивающих решеток учитывались конструкторами ОАО «ОКБМ Африкантов» при создании вводимых в эксплуатацию тепловыделяющих сборок. Результаты исследований используются для верификации CFD-кодов и программ детального поячеечного расчета активных зон с целью уменьшения консерватизма при обосновании технической надежности*.

ЛИТЕРАТУРА

1. К вопросу о методологии обоснования теплотехнической надежности активных зон водяных энергетических реакторов / С. М. Дмитриев [и др.] // Труды Нижегородского государственного технического университета имени Р. Е. Алексеева. 2014. № 2. С. 98–108.
2. Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах / С. М. Дмитриев [и др.]. М.: Машиностроение, 2013. 415 с.
3. Жуков, А. В. Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов: теоретические основы и физика процесса / А. В. Жуков, А. П. Сорокин, Н. М. Матюхин. М.: Энергоатомиздат, 1989. 130 с.
4. Гухман, А. А. Введение в теорию подобия. 2-е изд. перераб. и доп. / А. А. Гухман. М.: Высш. шк., 1973. 296 с.
5. Бородин, С. С. Особенности гидродинамики теплоносителя в альтернативных ТВС реакторов ВВЭР-1000 при использовании перемешивающих решеток / С. С. Бородин, С. М. Дмитриев // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2006. № 4. С. 70–76.
6. Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР / С. М. Дмитриев [и др.] // Атомная энергия. 2012. Т. 113, № 5. С. 252–257.
7. Исследования массообменных характеристик и эффективности перемешивающих решеток ТВСА-АЛЬФА реакторов ВВЭР / С. С. Бородин [и др.] // Труды Пятой Рос. нац. конф. по теплообмену: в 8 т. М.: Издат. дом МЭИ, 2010. Т. 1. С. 177–180.
8. Особенности локальной гидродинамики и массообмена теплоносителя в ТВС реакторов ВВЭР и PWR с перемешивающими решетками / С. С. Бородин [и др.] // Тепловые процессы в технике. 2013. Т. 5, № 3. С. 98–107.
9. 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.
10. Экспериментальные исследования локального массообмена и эффективности перемешивания теплоносителя дистанционирующими решетками в ТВС реактора КЛТ-40С / А. В. Варенцов [и др.] // Труды Нижегородского государственного технического университета имени Р. Е. Алексеева. 2012. № 1. С. 107–113.

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора от 3 декабря 2014 г. № 02.G25.31.0124 (в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

11. Экспериментальные исследования локальных гидродинамических характеристик потока в тепловыделяющих сборках реакторной установки плавучей атомной электростанции / А. В. Варенцов [и др.] // Труды Нижегородского государственного технического университета имени Р. Е. Алексеева. 2012. № 3. С. 118–125.
12. Экспериментальные и расчетные исследования гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в модели ТВС реактора КЛТ-40С / А. В. Варенцов [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 3. С. 114–119.

Поступила 12.04.2016 Подписана в печать 10.06.2016 Опубликована онлайн 29.11.2016

REFERENCES

1. Dmitriev S. M., Barinov A. A., Borodina V. E., Khrobostov A. E. (2014) Towards the Methodology of Thermotechnical Reliability of Active Zones of Water Power Reactors. *Trudy Nizhegorodskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta Imeni R. E. Alekseeva* [Proceedings of the Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev], (2), 98–108 (in Russian).
2. Dmitriev S. M., Zverev D. L., Bykh O. A., Panov Iu. K., Sorokin N. M. (2013) *Basic Equipment of a Shell-Type Thermal Neutron Reactor Nuclear Power Plant*. Moscow, Mashinostroyeniye. 415 (in Russian).
3. Zhukov A. V., Sorokin A. P., Matyukhin N. M. (1989) *Interchannel Exchange in Fuel Assemblies of Fast Reactors: Theoretical Fundamentals and the Physics*. Moscow, Energoatomizdat. 130 (in Russian).
4. Gukhman A. A. (1973) *Introduction into the Theory of Similarity*. 2nd ed. Moscow, Vysshaya Shkola. 296 (in Russian).
5. Borodin S. S., Dmitriev S. M. (2006) Specific Features of Hydrodynamics of the Coolant in Alternative Fuel Assemblies of the VVER-1000 Reactors by Using of Mixing Grids. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Yadernaya Energetika* [Nuclear Power Production. Proceedings of Higher Educational Institutions], (4), 70–76 (in Russian).
6. Dmitriev S. M., Borodin S. S., Legchanov M. A., Solntsev D. N., Sorokin V. D., Khrobostov A. E. (2012) Experimental Studies of Hydrodynamic and Mass-Transfer Properties of Coolant Flow in VVER Fuel Assemblies TVSA. *Atomic Energy*, 113 (5), 252–257. DOI: 10.1007/s10512-013-9638-6.
7. Borodin S. S., Dmitriev S. M., Legchanov M. A., Novikova O. Iu., Solntsev D. N., Khrobostov A. E. (2010) Study of the Mass Transfer Characteristics and Efficiency of Mixing Grids of FA-ALFA of VVER Reactors. *Trudy Piatoi Ros. Nats. Konf. po Teploobmenu*. T. 1 [Proceedings of the Fifth Russian National Conference on Heat Exchange. Vol. 1]. Moscow, Publishing House MEI, 177–180 (in Russian).
8. Borodin S. S., Dmitriev S. M., Legchanov M. A., Solntsev D. N., Sorokin V. D., Khrobostov A. E. (2013) Specific Features of Local Hydrodynamics and Mass Exchange Processes of Coolant in Fuel Assemblies of VVER and PWR Reactors with Mixing Grids. *Teplovyte Protssy v Tekhnike* [Thermal Processes in Engineering], 5 (3), 98–107 (in Russian).
9. Dmitriev S. M., Khrobostov A. E., Varentsov A. V., Dobrov A. A., Doronkov D. V., Sorokin V. D., Samoilov O. B. (2014) 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* [Thermal Engineering], 61 (8), 558–565. DOI: 10.1134/S0040363614080050.
10. Varentsov A. V., Doronkov D. V., Kupricheva E. S., Solntsev D. N., Sorokin V. D. (2012) Investigation of Local Mass Transfer and Efficiency of Spacer Grids of Fuel Assembly of Reactors KLT-40С. *Trudy Nizhegorodskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta Imeni R. E. Alekseeva* [Proceedings of the Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev], (1), 107–113 (in Russian).
11. Varentsov A. V., Ziablitshev D. V., Solntsev D. N., Pronin A. N., Morozkin O. N. (2012) Experimental Study of Local Hydrodynamic Characteristics of the Flow in Fuel Assemblies of the Reactor Installation of Floating Nuclear Power Plant. *Trudy Nizhegorodskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta Imeni R. E. Alekseeva* [Proceedings of the Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev], (3), 118–125 (in Russian).
12. Varentsov A. V., Dmitriev S. M., Dobrov A. A., Solntsev D. N., Khrobostov A. E. (2013) Experimental and Numerical Researches of Hydrodynamics and Mass Transfer of Coolant Flow in Experimental Model of KLT-40С Reactor Fuel Assembly. *Nauchno-Tekhnicheskii Vestnik Povolzhya* [Scientific and Technical Volga Region Bulletin], (3), 114–119 (in Russian).

Received: 12 April 2016 Accepted: 10 June 2016 Published online: 29 November 2016