
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 621.039

С.С. Бородин, Д.В. Доронков, М.А. Легчанов, Е.Н. Полозкова, О.Б. Солдаткин,
В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов

РАСЧЕТНО–ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА ПЛАВУЧЕГО ЭНЕРГООБЛОКА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты экспериментальных исследований особенностей течения теплоносителя в тепловыделяющей сборке реактора КЛТ-40С за пластинчатой дистанционирующей решеткой. Исследования проводились на аэродинамическом стенде методом диффузии газового трассера. Анализ пространственного распределения проекций абсолютной скорости потока и распространения концентраций трассера позволил детализировать картину течения теплоносителя в тепловыделяющей сборке. На основе полученных результатов сделаны рекомендации по уточнению методик определения расходов теплоносителя для программ поячеечного расчета активной зоны реактора КЛТ-40С. Результаты исследований приняты для практического использования в АО «ОКБМ Африкантов» при оценке теплотехнической надежности активных зон реакторов данного типа, а также включены в базу данных для верификации программ вычислительной гидродинамики (CFD кодов).

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

Введение

В настоящее время в России идет завершающий этап строительства плавучего энергоблока «Академик Ломоносов», источник энергии которого – реактор КЛТ-40С. Главным конструктором и поставщиком оборудования для данной реакторной установки является АО «ОКБМ Африкантов».

В основе проекта реактора КЛТ-40С лежит переход от активной зоны канального типа традиционной ледокольной реакторной установки к активной зоне кассетного типа. Новая активная зона состоит из чехловых тепловыделяющих сборок (ТВС) с пластинчатыми дистанционирующими решетками (ДР) [1]. Конструктивные особенности кассетной активной зоны КЛТ-40С по сравнению с традиционными решениями активных зон атомных ледоколов обусловили необходимость оценки теплотехнической надежности.

Обоснование теплотехнической надежности активной зоны ядерного реактора во многом базируется на теплогидравлическом расчете [2], который проводится с использованием программ детального поячеечного расчета активных зон водо-водяных ядерных реакторов [3]. Большинство таких программ основаны на математических моделях, включающих в себя эмпирические коэффициенты, учитывающие влияние различных конструктивных элементов ТВС на гидродинамику, тепло- и массообмен теплоносителя, что предполагает проведение дополнительных работ по их валидации.

Следовательно, особенности конструкции ТВС реактора КЛТ-40С требуют экспериментального исследования закономерностей формирования локальных гидродинамических

характеристик потока теплоносителя в пучках ТВЭЛов за ДР, что является актуальной задачей, решение которой позволит обосновать теплотехническую надежность активной зоны реактора КЛТ-40С.

Экспериментальный стенд и методика измерений

Для исследования гидродинамики теплоносителя в ТВС реактора КЛТ-40С 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) (рис. 1, а); расходомерное устройство; система подачи и отбора трассера; измерительный комплекс.

Исследования проводились на 84-стержневой модели ТВС, выполненной с коэффициентом геометрического подобия 5,9 и имеющей длину 3 м. Экспериментальная модель состоит из ТВЭЛов-имитаторов диаметром $d=40$ мм, расположенных с шагом $s/d=1,46$ (s – расстояние между центрами ТВЭЛов-имитаторов), имитаторов стержней выгорающего поглотителя диаметром $d=26$ мм и поясов дистанционирующих решеток, представляющих собой трехуровневый набор пластин, заключенных в общий бандаж (рис. 1, б).

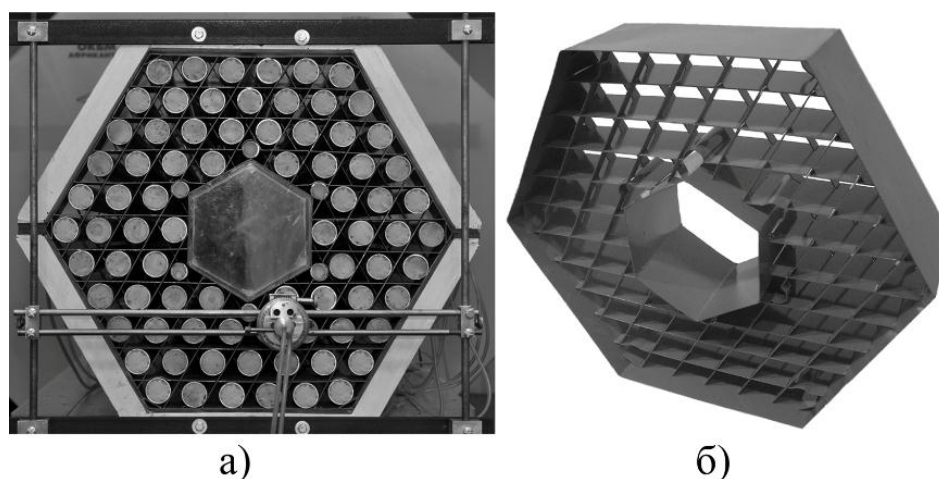


Рис. 1. Экспериментальная модель (а) и пояс дистанционирующей решетки (б)

В состав измерительного комплекса входят: пятиканальный пневмометрический зонд; трубка Пито-Прандтля; блок аналоговых преобразователей давления; газоанализатор; расходомер газа; ЭВМ.

Измерения концентрации углеводородов C_nH_m в газовой смеси осуществлялись газоанализатором посредством зонда, представляющего собой трубку Пито-Прандтля. Диапазон измеряемых концентраций составляет 0-10000ppm, погрешности измерений с учетом индивидуальной градуировки равны $\pm 15\text{ppm}$ (0–1000ppm) и $\pm 1,5\%$ (1000–10000ppm) [6].

Поддержание заданного расхода трассера осуществлялось массовым расходомером. Погрешность измерения расхода газа составляла не более 0,5%.

Измерение вектора скорости потока теплоносителя осуществлялось пятиканальным пневмометрическим зондом, который имеет пять стальных капилляров диаметром 0,8 мм, расположенных в двух перпендикулярных друг к другу диаметральных плоскостях. Чувствительная часть зонда 20 мм. Остальная часть капилляров проложена внутри державки зонда, которая представляет собой стальную трубку диаметром 5 мм. Общая длина зонда 600 мм. Предельные отклонения проекций абсолютной скорости на оси X , Y , Z не превышают 7,5% от абсолютной скорости.

Снятие показаний с пятиканального пневмометрического зонда производилось блоком аналоговых преобразователей давления. Диапазон измерений данных преобразователей 0-4 кПа, предел допускаемой основной погрешности данных приборов $\pm 0,25\%$.

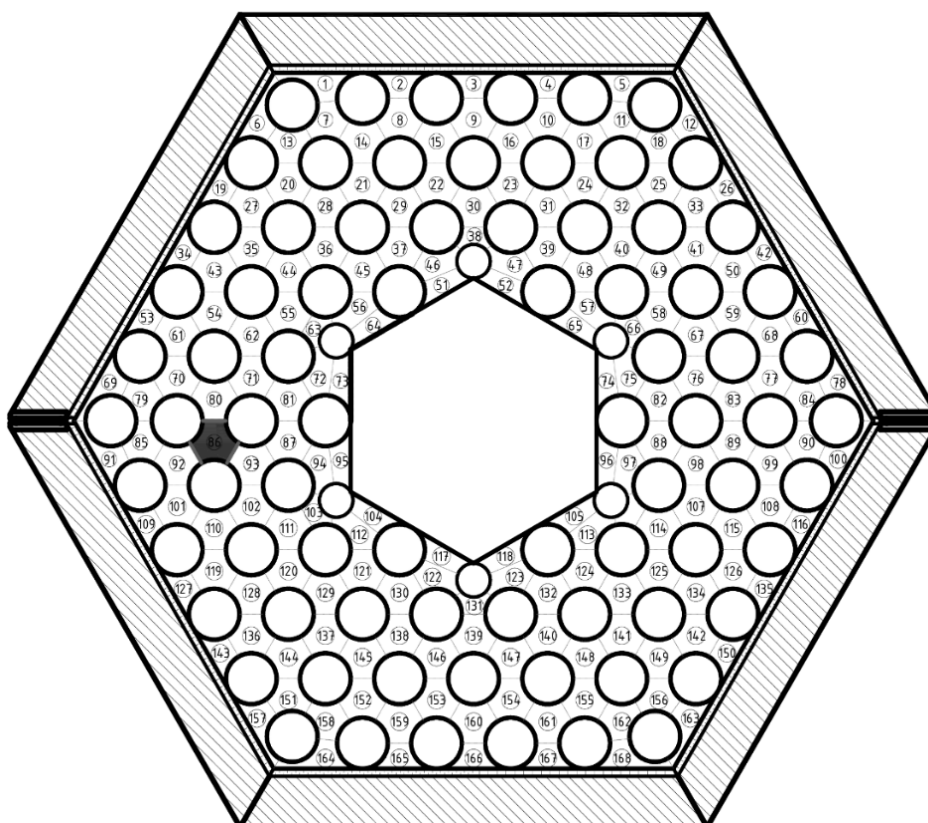


Рис. 2. Поперечное сечение ЭМ с расположением ячейки инжекции газа трассера

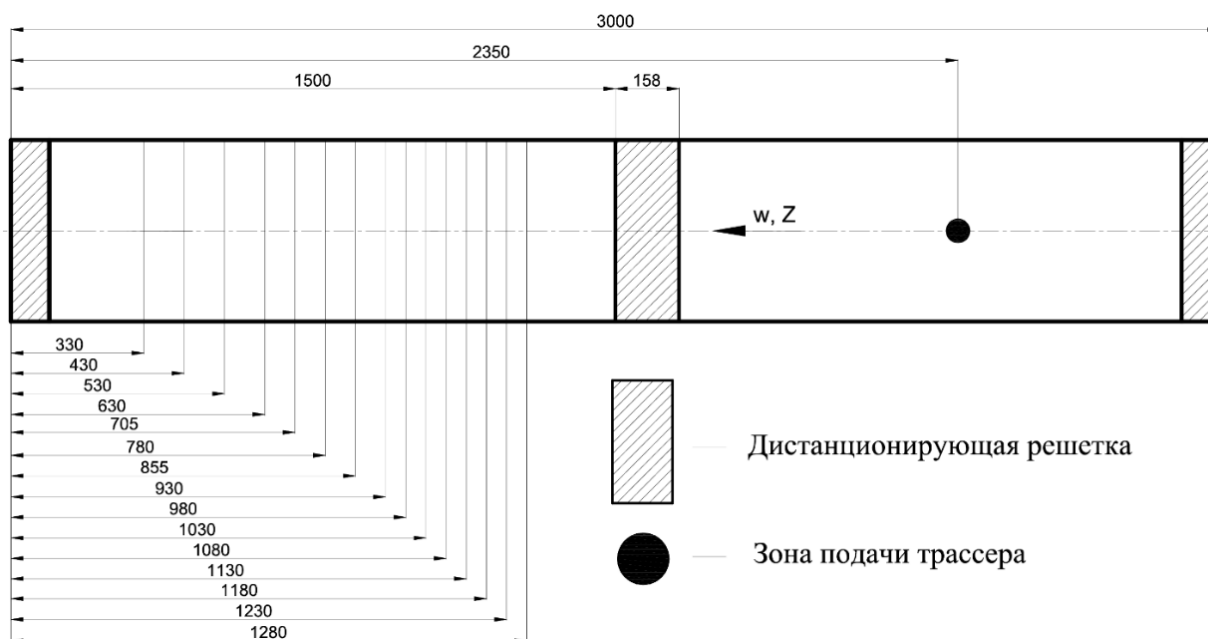


Рис. 3. Схема расположения сечений измерения концентрации трассера по длине ЭМ

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 гидродинамики и межъячеечного массообмена потока 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 55000, а все исследования проводились при числе Рейнольдса 90000 на участке стабилизированного автомодельного течения теплоносителя. Значение среднерасходной скорости на входе в ЭМ составляло $\overline{W}_z = 34,5$ м/с.

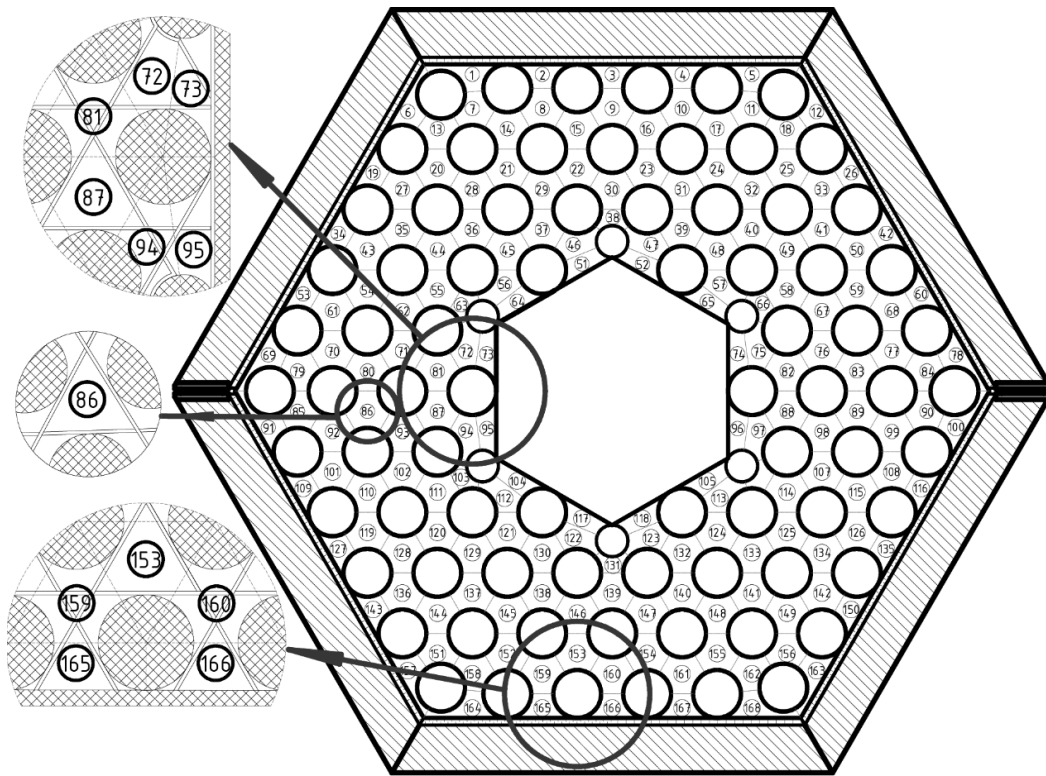


Рис. 4. Области измерения вектора скорости в поперечном сечении ЭМ



Рис. 5. Схема расположения сечений измерения гидродинамических характеристик по длине ЭМ

Также на аэродинамическом стенде был экспериментально определен коэффициент гидравлического сопротивления (КГС) пояса ДР. Проведение данных работ обусловлено тем, что обоснование представительности экспериментальных исследований требует соблюдения равенства КГС натуральных решеток и решеток ЭМ. Анализ результатов исследований КГС показывает, что выбранная конструкция и геометрические характеристики ДР в области автомодельного течения обеспечивают необходимое гидравлическое сопротивление, а полученное значение соответствует КГС натуральных решеток и составляет $\xi_{\text{ДР}} = 0,29$.

Изучение межъячеечного массообмена потока в ЭМ проводилось с применением метода диффузии примесей [5]. Данный метод основан на регистрации поперечного потока массы по некоторой переносимой субстанции. В качестве примеси выбран пропан, поскольку он обладает наиболее близкими к воздуху свойствами, возможностью быстрой и достаточно точной регистрации его концентрации. Исследования межъячеечного массообмена проводились при расположении ДР, моделирующем шаг между штатными решетками. Методика проведения исследований заключалась в следующем:

- газовый трассер через впускной зонд подавался в характерную ячейку №86 ЭМ до пояса ДР по ходу течения потока теплоносителя (рис. 2);
- с помощью отборного зонда производился замер концентрации трассера газоанализатором по центрам всех ячеек за исследуемым поясом ДР в характерных сечениях по длине ЭМ (рис. 3);

на основе полученных данных строились графики зависимости распределения концентрации трассера от относительной координаты.

Методика проведения исследований локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя заключалась в следующем:

1) измерение локальных полей скорости пятиканальным пневмометрическим зондом проводились в выделенных областях поперечного сечения ЭМ (рис. 4);

2) в каждой из указанных областей измерения проводились непосредственно за исследуемым поясом ДР в 19 сечениях по длине модели (рис. 5).

Результаты исследования гидродинамики и межъячеечного массообмена теплоносителя в ТВС реактора КЛТ-40С

Комплексный анализ результатов исследований гидродинамики потока теплоносителя в ТВС реактора КЛТ-40С позволил заключить следующее:

1. Во всех ячейках ТВС реактора КЛТ-40С поток теплоносителя преимущественно имеет осевой характер движения, при этом поперечное перемешивание теплоносителя между ячейками происходит за счет естественной турбулентности потока.

2. В центре стандартных ячеек, где пластины практически не препятствуют прохождению теплоносителя (рис 6, а), наблюдается ярко выраженное ядро потока, имеющее треугольную форму (рис. 7). Значение аксиальной составляющей вектора скорости в ядре потока достигает максимального значения и составляет $(W_z / \overline{W_z}) = 1,1 \div 1,2$ от среднерасходной скорости (рис. 7). При этом аксиальная составляющая вектора скорости в таких типах ячеек на 10-15 % больше (рис. 8), чем в стандартных ячейках, где пластины ДР затесняют проходное сечение в виде треугольника в центре ячейки (рис. 6, б). Данное явление объясняется тем, что пластины ДР реактора КЛТ-40С создают дополнительное гидравлическое сопротивление потоку.

3. Анализ распределения расходов G_i / G_j (i, j – порядковый номер ячеек экспериментальной модели) в стандартных ячейках ТВС двух вариантов затеснения проходного сечения пластинами ДР показал, что через ячейки, где пластины ДР практически не препятствуют прохождению теплоносителя, расход теплоносителя на 10% больше, чем через ячейки, где пластины ДР затесняют проходное сечение в виде треугольника в центре (рис. 9).

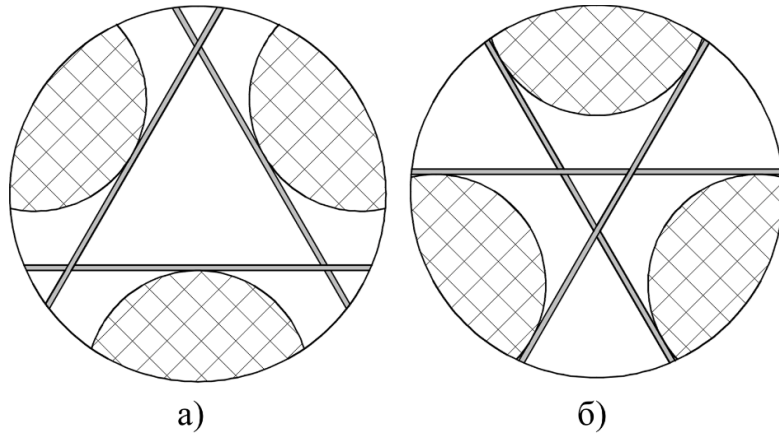


Рис. 6. Общий вид стандартных ячеек ЭМ:

a – пластины ДР практически не препятствуют прохождению теплоносителя (тип 1);
б – пластины ДР затесняют проходное сечение в виде треугольника в центре ячейки (тип 2)

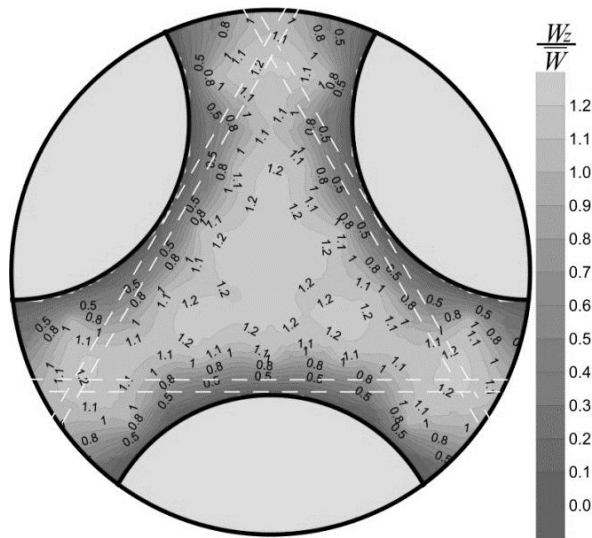


Рис. 7. Картограмма распределения аксиальной скорости потока теплоносителя для ячеек с пластинами ДР, практически не препятствующими прохождению теплоносителя

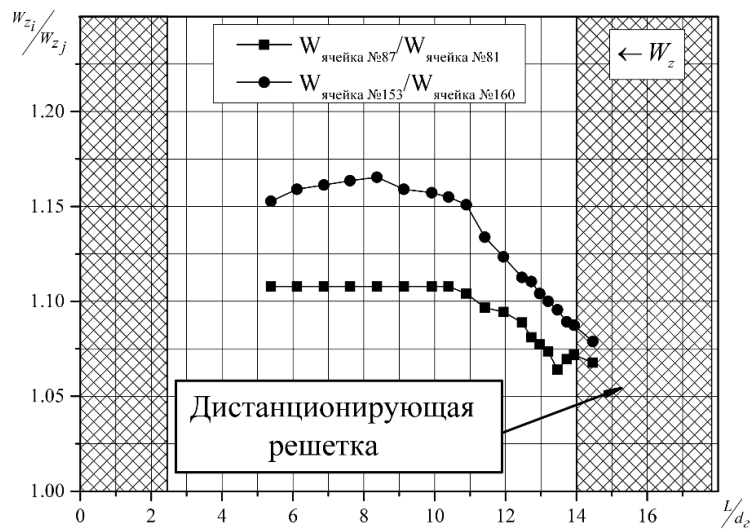


Рис. 8. Отношение аксиальной составляющей вектора скорости в стандартных ячейках двух вариантов затеснения проходного сечения:
i, j – номера ячеек экспериментальной модели

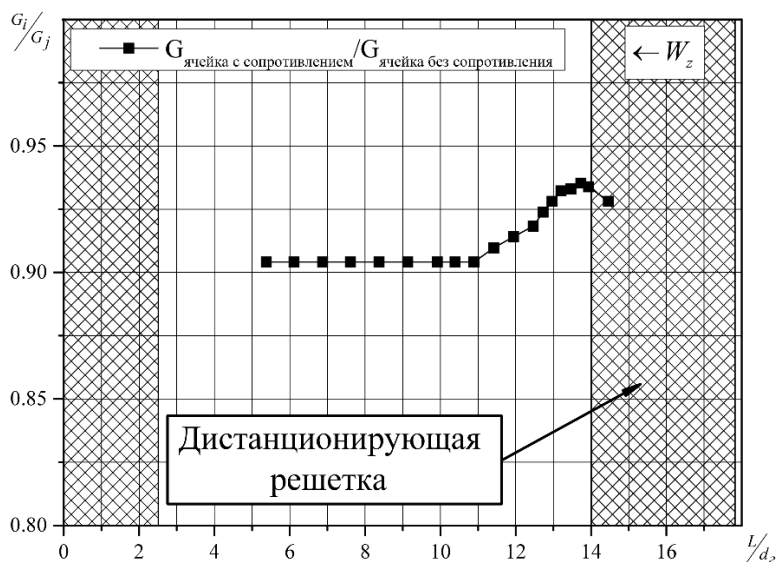


Рис. 9. Отношение распределения расхода теплоносителя через стандартные ячейки двух вариантов затеснения проходного сечения

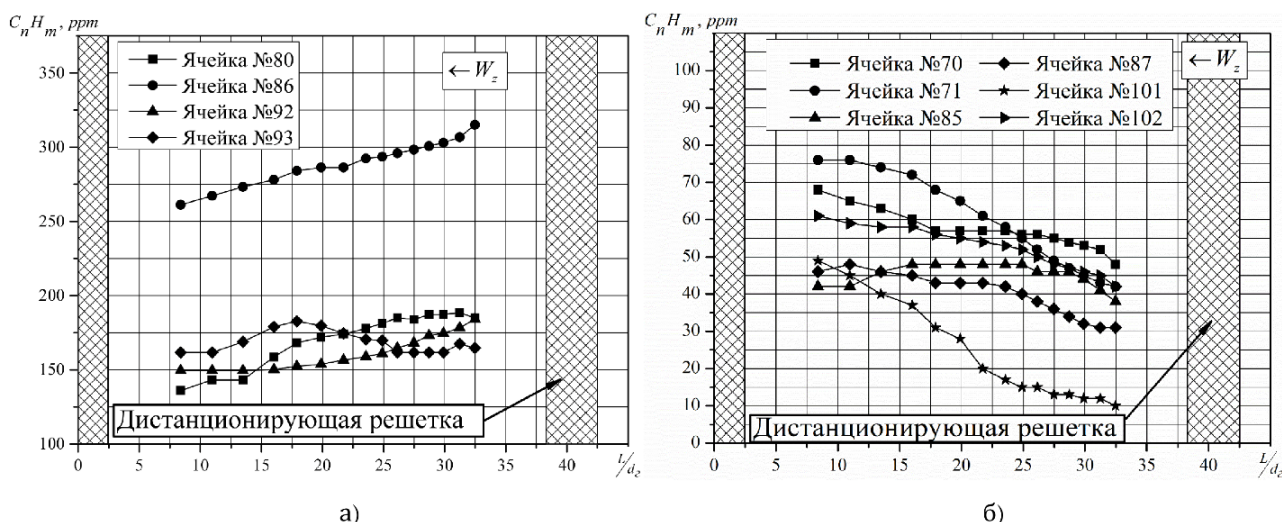


Рис. 10. Распределение концентрации трассера по длине ЭМ за поясом ДР

Комплексный анализ результатов исследований межъячеечного массообмена теплоносителя в ТВС реактора КЛТ-40С позволил выявить основные закономерности движения потока теплоносителя за поясом ДР:

1. Посредством механизма турбулентного переноса за ДР экспериментальной модели часть поперечного потока теплоносителя из каждой ячейки переходит в смежную с ней ячейку, смешиваясь при этом с основным осевым потоком. Трассер в ячейке инъекции 86 на расстоянии за ДР $L/d_2=32,5$ имеет значение 315 ppm. Из ячейки подачи трассер под воздействием турбулентного массопереноса распространяется в соседние ячейки 80, 92, 93 (рис. 10, а). Далее трассер из ячейки 80 переходит в ячейки 70, 71. Аналогично из ячеек 92 и 93 трассер распространяется в смежные ячейки 85, 101 и 87, 102 (рис. 10, б).

2. Дистанционирующая решетка ТВС реактора КЛТ-40С вносит возмущение в поток теплоносителя, вследствие чего возрастает интенсивность межъячеечного массообмена, характеризующая степень турбулентности потока. С другой стороны, наличие турбулентного трения приводит к диссипации энергии движения потока, тем самым «сглаживая» возмущения, вносимые решеткой. На рис. 10, а виден характер затухания возмущений за поясом ДР.

3. Дистанционирующие решетки, состоящие из пластин, не приводят к интенсивному

перемешиванию потока теплоносителя, так как распространение трассера в поперечном сечении ЭМ за ДР охватывает не более одиннадцати ячеек вокруг точки инъекции, обусловлено меньшей перемешивающей способностью пластинчатой ДР, а также тем, что ТВС имеет раздвинутый пучок ТВЭЛов.

Анализ аксиальной скорости потока теплоносителя в модели ТВС реактора КЛТ-40С с использованием расчетного кода КАНАЛ

Код КАНАЛ предназначен для ячейкового теплогидравлического расчета ТВС со стержневыми ТВЭЛами в стационарных режимах работы активных зон водо-водяных реакторов [7]. Анализ распределения аксиальной скорости потока теплоносителя в модели ТВС реактора КЛТ-40С проводился с помощью кода КАНАЛ, адаптированного к расчетам гидродинамических характеристик воздушных потоков. Перед проведением расчетов аксиальной скорости в характерных ячейках за ДР модели ТВС реактора КЛТ-40С в программе КАНАЛ необходимо построить расчетную область В поперечном сечении расчетная область содержала все 168 ячеек модели ТВС реактора КЛТ-40С, включая ТВЭЛы, стержни выгорающего поглотителя и центральный вытеснитель.

Ячейки расчетной области были разделены на 14 характерных типов. Разделение ячеек основывалось на величине гидравлического сопротивления, обусловленного различной конфигурацией пластин ДР. В продольном сечении ТВС реактора КЛТ-40С была разбита на 32 расчетных участка. ДР задавалась массивом коэффициентов гидравлического сопротивления ячеек на расчетном участке, соответствующем ее расположению в ЭМ.

На основе анализа результатов экспериментального и расчетного распределения аксиальной скорости за ДР по длине модели ТВС реактора КЛТ-40С можно заключить следующее:

1. Коэффициент гидравлического сопротивления ДР, полученный на основе расчетных данных, составил 0,26. Погрешность относительно экспериментального значения коэффициента гидравлического сопротивления ДР, равного 0,29, составила 10%.

2. Расчетное и экспериментальное распределения аксиальной скорости по длине ЭМ за ДР в ячейках, где пластины ДР затесняют проходное сечение в виде треугольника в центре, имеет различный характер (рис. 11а). В ячейках, где пластины ДР практически не препятствуют прохождению теплоносителя, наблюдается совпадение характера расчетного и экспериментального распределения аксиальной скорости по длине ЭМ (рис. 11, б). Данный факт показывает то, что ячейки с различными типами затеснения поперечного сечения имеют различное гидравлическое сопротивление, что не учтено в коде КАНАЛ.

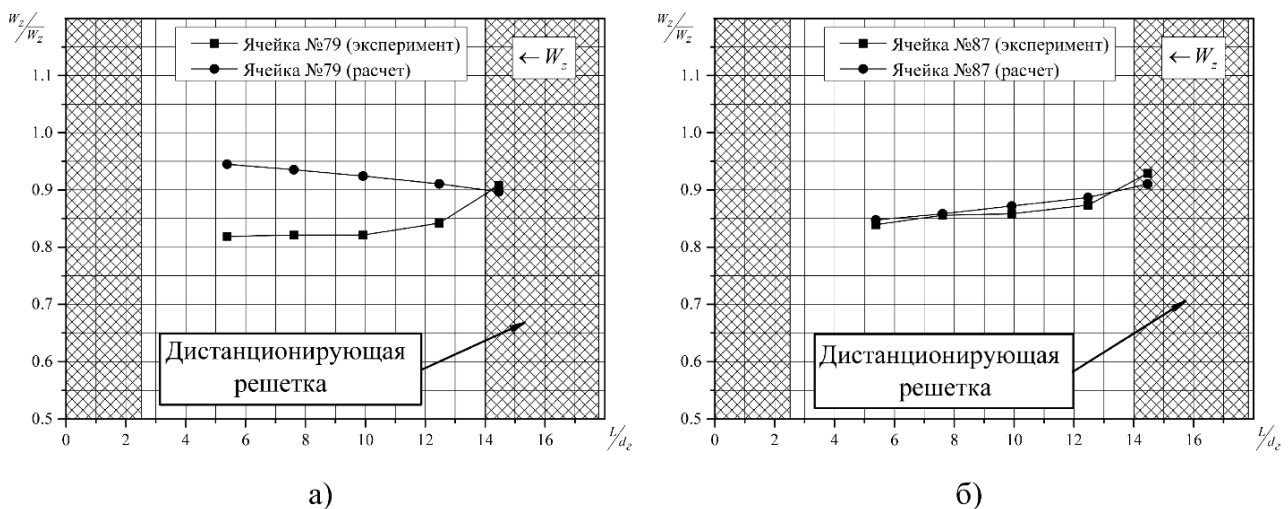


Рис. 11. Расчетное и экспериментальное распределение аксиальной скорости:
 а – в ячейке, где пластины ДР затесняют проходное сечение в виде треугольника в центре;
 б – в ячейке, где пластины ДР практически не препятствуют прохождению теплоносителя

3. В выходном сечении модели ТВС реактора КЛТ-40С наблюдается схожий характер

распределения расчетного и экспериментального значений аксиальной скорости для всех исследованных ячеек (рис. 12).

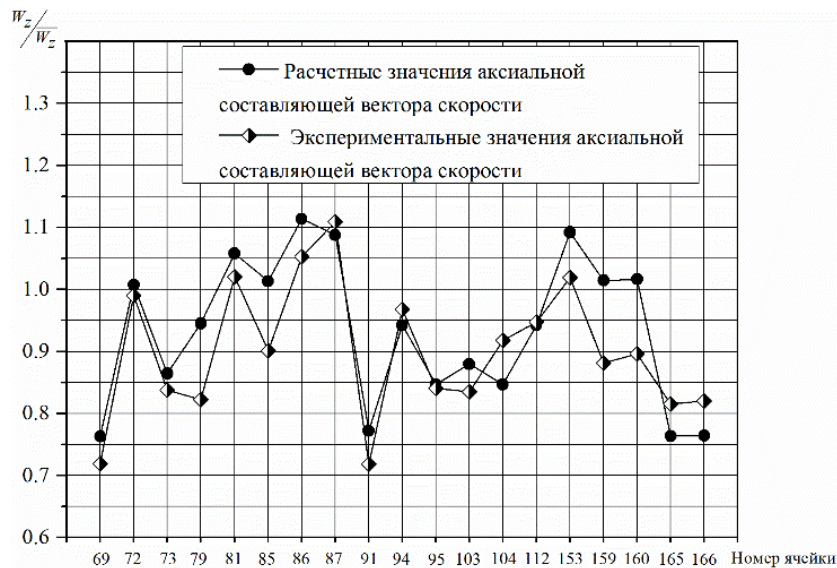


Рис. 12. Расчетное и экспериментальное распределение аксиальной скорости в выходном сечении ЭМ

Заключение

На основе комплексного анализа экспериментальных и расчетных данных сделаны следующие выводы:

1. Во всех исследуемых областях ТВС КЛТ-40С поток теплоносителя преимущественно имеет осевой характер движения.

2. Выявлено, что в стандартных ячейках, где пластины дистанционирующей решетки практически не препятствуют прохождению теплоносителя, значения аксиальной составляющей вектора скорости на 10–15% больше, чем в ячейках, где пластины дистанционирующей решетки затесняют проходное сечение.

3. Определено, что через ячейки, где пластины дистанционирующей решетки практически не препятствуют прохождению теплоносителя, расход теплоносителя на 10% больше, чем через ячейки, где пластины дистанционирующей решетки затесняют проходное сечение.

4. Дистанционирующая решетка ТВС реактора КЛТ-40С вносит возмущение в поток теплоносителя, вследствие чего возрастает интенсивность межъячеечного массообмена, характеризующаяся степенью турбулентности потока. С другой стороны, наличие турбулентного трения приводит к диссипации энергии движения потока, тем самым «сглаживая» возмущения, вносимые решеткой.

5. Дистанционирующие решетки, состоящие из пластин, не приводят к интенсивному перемешиванию потока теплоносителя, что обусловлено меньшей перемешивающей способностью пластинчатой дистанционирующей решетки, а также тем, что ТВС имеет раздвинутый пучок ТВЭЛов.

6. Повышение точности расчета распределения аксиальной скорости потока теплоносителя по ячейкам за дистанционирующей решеткой ТВС реактора КЛТ-40С требует проведения комплекса экспериментальных исследований для определения коэффициентов гидравлического сопротивления ячеек всех вариантов затеснения поперечного сечения, которые используются в качестве исходных данных, входящих в замыкающие системы уравнений, используемых в программе КАНАЛ.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0124 от 03 декабря 2014 г. (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

Библиографический список

1. **Дмитриев, С.М.** Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах / С.М. Дмитриев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2013.
2. **Баринов, А.А.** К вопросу о методологии обоснования теплотехнической надежности активных зон водяных энергетических реакторов / А.А. Баринов [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. №2. С. 98–108.
3. **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.
4. **Варенцов, А.В.** 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.
5. **Жуков, А.В.** Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов: Теоретические основы и физика процесса / А.В. Жуков [и др.] – М.: Энергоатомиздат. – 1989.
6. **Бородин, С.С.** Особенности локальной гидродинамики и массообмена теплоносителя в ТВС реакторов ВВЭР и PWR с перемешивающими решетками / С.С. Бородин [и др.] // Тепловые процессы в технике. 2014. Т. 5. Вып 3. С. 98–107.
7. **Дмитриев, С.М.** Обоснование корреляции для расчета критического теплового потока в тепловыделяющих сборках альтернативной конструкции с перемешивающими решетками-интенсификаторами для ВВЭР-1000 / С.М. Дмитриев [и др.] // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2012. №1. С. 99–108.

*Дата поступления
в редакцию 25.06.2015*

**S.S. Borodin, D.V. Doronkov, M.A. Legchanov, E.N. Polozkova,
O.B Soldatkin, V.D. Sorokin, A.E. Khrobostov**

DESIGN AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE FLOW OF COOLANT IN THE REACTOR CORE FLOATING POWER

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

Purpose: The main objective of the research was to investigate the characteristics of mass transfer and hydrodynamics of the coolant flow in the fuel assembly KLT-40S reactor.

Design/methodology/approach: The main method of hydrodynamics and mass transfer in the nuclear reactor FA investigation is an experimental research of a full-size cassette model and active zones of aero- and hydrodynamics stands. For the local characteristics of intercellular mass transfer and hydrodynamics of the heat carrier in the KLT-40S nuclear reactor FA research the gas diffusion method was used.

Findings: Experimental researches of heat carrier mass transfer in the nuclear reactor FA were organized. The heat carrier flow features in fuel assemblies of the KLT-40S reactor were revealed.

Research limitations/implications: The special databank was created on the base of the experiment results. The data are used for verifying CFD-codes to reduce conservatism on esteeming the KLT-40S reactor heat engineering reliability. The results of the research were accepted are now used by Join Stock Company OKBM Afrikantov.

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 KLT-40S reactor active zone.

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