

УДК 621.039

**Исследования гидродинамических характеристик
и особенностей течения теплоносителя
за дистанционирующей решеткой
тепловыделяющей сборки реактора
плавучего энергоблока***

**С.М. Дмитриев, Д.В. Доронков, М.А. Легчанов, А.Н. Пронин,
Д.Н. Солнцев, В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов**

*Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева*

E-mail: nevid000@mail.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований локальной гидродинамики потока 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 за дистанционирующей решеткой тепловыделяющей сборки. На основе полученных результатов сделаны рекомендации по уточнению методик определения расходов теплоносителя для программ пояеичного 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: активная зона, тепловыделяющая сборка, дистанционирующая решетка, коэффициент гидравлического сопротивления, гидродинамика теплоносителя.

Введение

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

В основе проекта реактора КЛТ-40С лежит переход от активной зоны канального типа, используемой в традиционной ледокольной реакторной установке, 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.

* Работа проведена в рамках выполнения базовой части государственного задания № 2014/133.

Обоснование теплотехнической надежности активной зоны ядерного реактора во многом базируется на теплогидравлическом расчете [2], который проводится с использованием программ детального поэлементного 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 [4–6].

Таким образом, 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. 1а), расходомерное устройство, система подачи и отбора трассера, измерительный комплекс.

Исследования проводились на 84-стержневой модели ТВС реактора КЛТ-40С, 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. 1б) [7].

В состав измерительного комплекса входят: пятиканальный пневмометрический зонд, трубка Пито–Прандтля, блок аналоговых преобразователей давления, газоанализатор, расходомер газа, компьютер.

Измерения концентрации углеводородов $C_n H_m$ в газовой смеси осуществлялись газоанализатором посредством зонда, представляющего собой трубку Пито–Прандтля. Диапазон измеряемых концентраций составляет $0–10000$ млн⁻¹, погрешности измерений с учетом индивидуальной градуировки равны ± 15 млн⁻¹ ($0–1000$ млн⁻¹) и $\pm 1,5\%$ ($1000–10000$ млн⁻¹) [8].

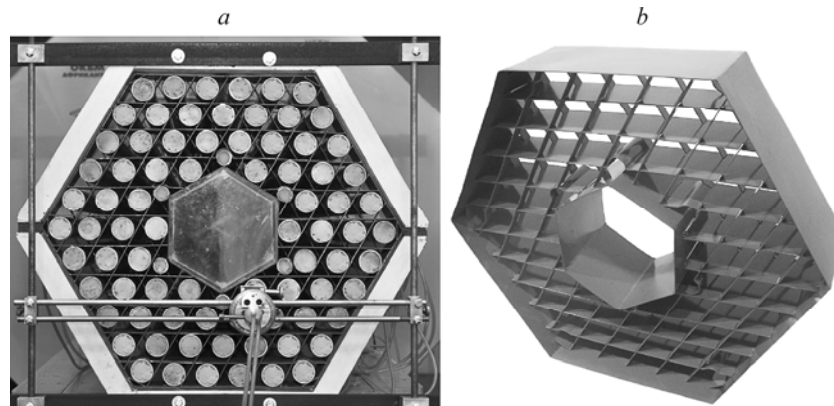


Рис. 1. Экспериментальная модель и пояс дистанционирующей решетки.
а — экспериментальная модель, б — пояс дистанционирующей решетки.

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 имеет длину 20 мм. Остальная часть капилляров проложена внутри державки зонда, которая представляет собой стальную трубку диаметром 5 мм. Общая длина зонда составляет 600 мм. Предельные отклонения проекций абсолютной скорости на осях X , Y , Z не превышают 7,5 % от абсолютной скорости.

Снятие показаний с пятиканального пневмометрического зонда проводилось блоком аналоговых преобразователей давления. Значения измерений данных преобразователей лежали в диапазоне 0–4 кПа, предел допускаемой основной погрешности данных приборов составлял $\pm 0,25$ %.

Важным этапом проведения экспериментальных исследований является подтверждение набора данных в широком диапазоне режимных параметров. Поскольку моделирование течения водяного теплоносителя осуществляется при помощи воздуха, 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. Согласно этому был проведен ряд испытаний, направленных на определение режимов течения теплоносителя в ЭМ, нахождение границ зон автомодельного течения теплоносителя. По полученным результатам было определено, что область автомодельного течения в ЭМ начинается при числе Рейнольдса, равном 55000, а все исследования проводились на участке стабилизированного автомодельного течения теплоносителя при числе Рейнольдса, равном 90000. Значение среднерасходной скорости на входе в ЭМ составляло $\overline{Wz} = 34,5$ м/с.

На аэродинамическом стенде также был экспериментально определен коэффициент гидравлического сопротивления (КГС) пояса ДР. Необходимость исследования КГС дистанционирующей решетки экспериментальной модели вызвана тем, что требуется соблюдение равенства местного гидравлического сопротивления натуральных решеток и решеток модели. 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 $\xi_{др} = 0,29$.

Изучение межъячеечного массообмена потока в ЭМ проводилось с применением метода диффузии примесей [9]. Данный метод основан на регистрации поперечного потока массы по некоторой переносимой субстанции. В качестве примеси был выбран пропан, поскольку он обладает наиболее близкими к воздуху свойствами при возможности быстрой и достаточно точной регистрации его концентрации [10]. 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);

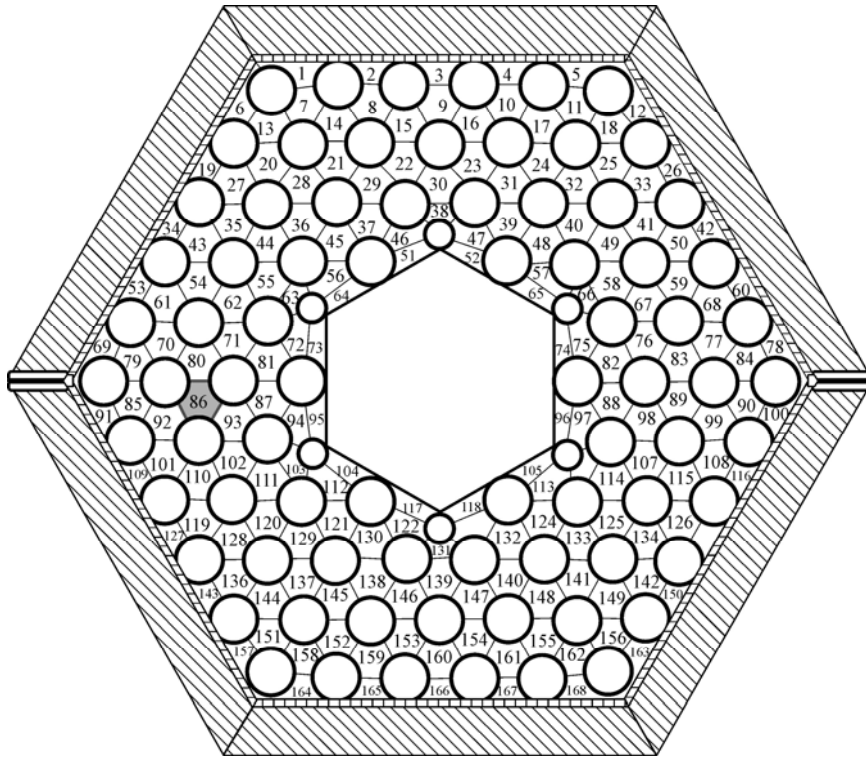


Рис. 2. Поперечное сечение ЭМ с расположением ячейки инъекции газа трассера.

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

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

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

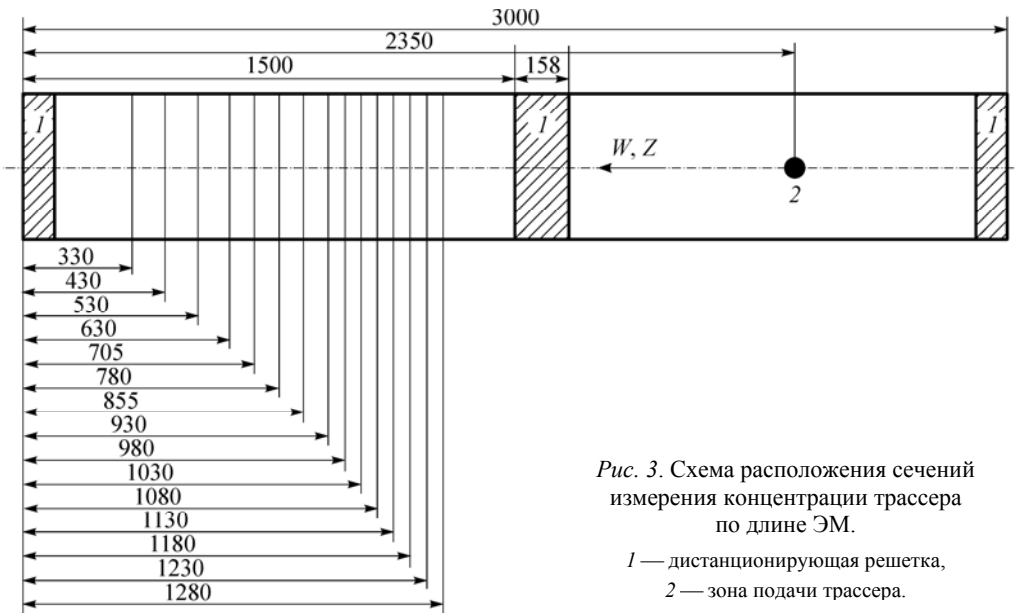


Рис. 3. Схема расположения сечений измерения концентрации трассера по длине ЭМ.

1 — дистанционирующая решетка,
2 — зона подачи трассера.

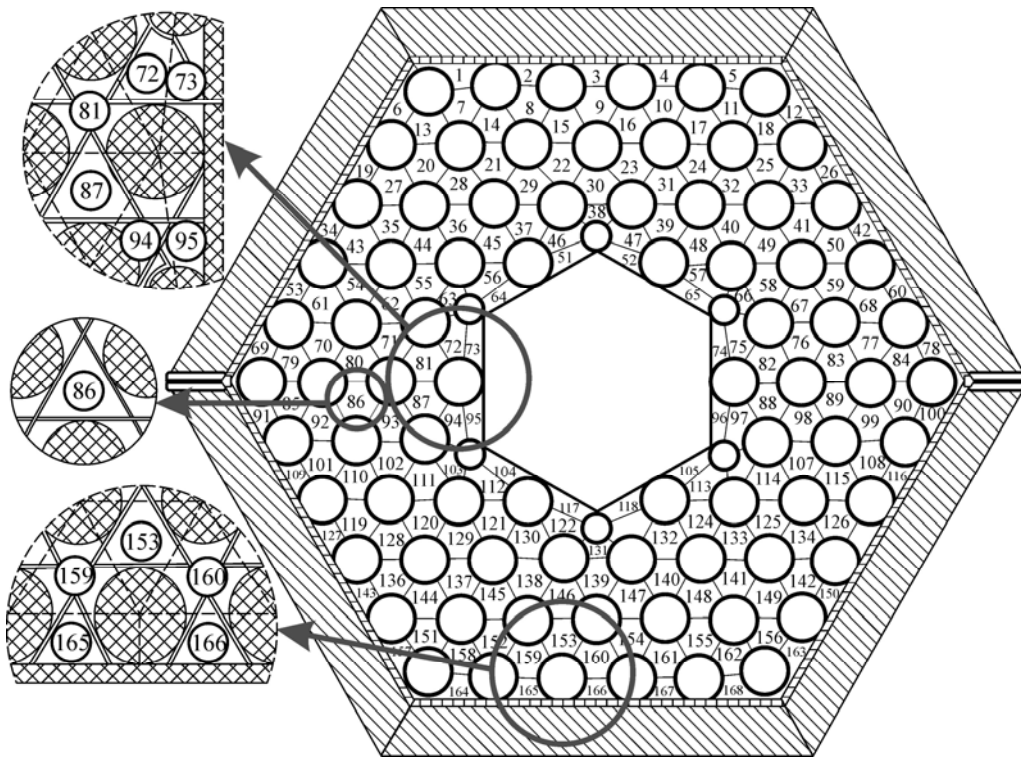


Рис. 4. Области измерения вектора скорости в поперечном сечении ЭМ.

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



Рис. 5. Схема расположения сечений измерения гидродинамических характеристик по длине ЭМ.
I — дистанционирующая решетка.

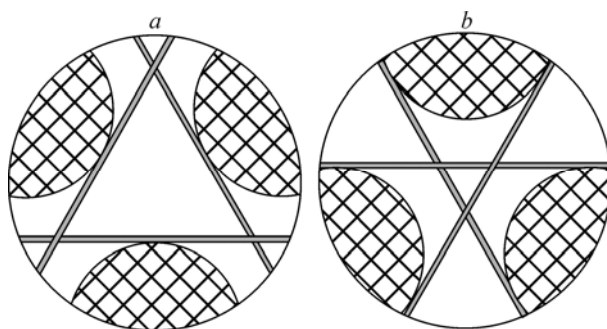


Рис. 6. Общий вид стандартных ячеек ЭМ.

a — пластины ДР практически не препятствуют прохождению теплоносителя,
b — пластины ДР затесняют проходное сечение в виде треугольника в центре ячейки.

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 сделать следующее заключение.

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*a*), 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 ячейках такого типа на 10–15 % больше (рис. 8), чем в стандартных ячейках, где пластины ДР

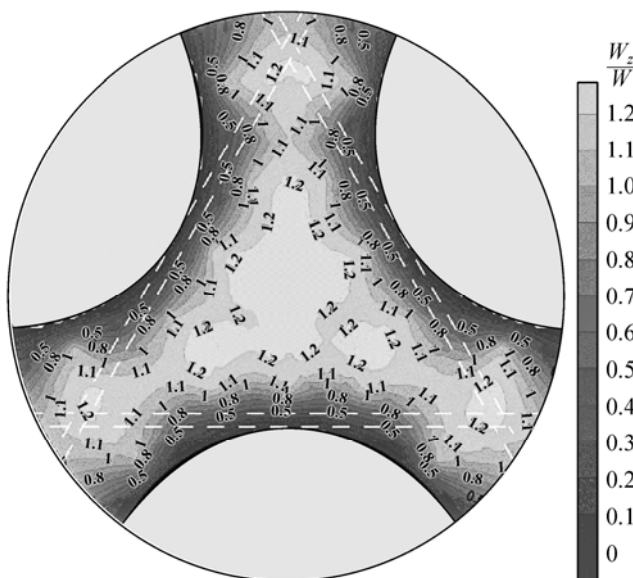


Рис. 7. Картограмма распределения аксиальной скорости потока теплоносителя для ячеек, где пластины ДР практически не препятствуют прохождению потока теплоносителя.

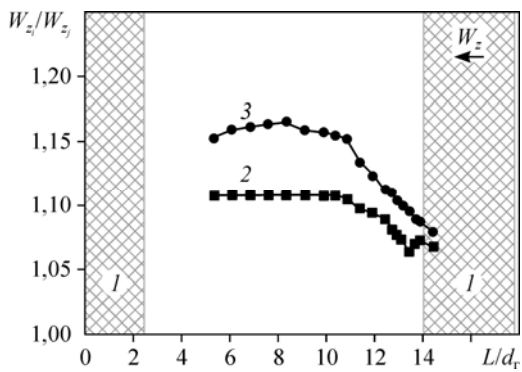


Рис. 8. Отношение аксиальной составляющей вектора скорости в стандартных ячейках двух вариантов затеснения проходного сечения.

1 — дистанционирующая решетка, 2 — $W_{\text{ячейка 1 типа}}/W_{\text{ячейка 2 типа}}$,
3 — $W_{\text{ячейка 1 типа}}/W_{\text{ячейка 2 типа}}$

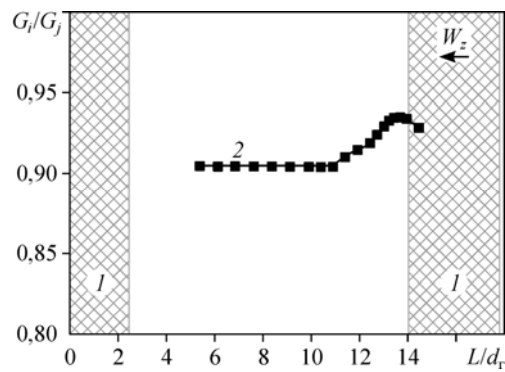


Рис. 9. Отношение распределения расхода теплоносителя через стандартные ячейки двух вариантов затеснения проходного сечения.

1 — дистанционирующая решетка,
2 — $G_{\text{ячейка 2 типа}}/G_{\text{ячейка 1 типа}}$

затесняют проходное сечение в виде треугольника в центре ячейки (рис. 6b). Это явление объясняется тем, что пластины ДР реактора КЛТ-40С создают дополнительное гидравлическое сопротивление потоку.

3. Анализ распределения расходов G_i/G_j , где i, j — порядковый номер ячеек экспериментальной модели, в стандартных ячейках ТВС для 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).

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 $L/d_r = 32,5$ имеет значение 315 млн^{-1} . Из ячейки подачи трассер под воздействием турбулентного массопереноса распространяется в соседние ячейки №№ 80, 92 и 93 (рис. 10a). Далее трассер из ячейки № 80 переходит в ячейки №№ 70, 71. Аналогично из ячеек № 92 и № 93 трассер распространяется соответственно в смежные ячейки №№ 85, 101 и №№ 87, 102 (рис. 10b).

2. 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. На рис. 10a виден характер затухания возмущений за поясом ДР.

3. Дистанционирующие решетки, состоящие из пластин, не приводят к интенсивному перемешиванию потока теплоносителя, т.к. распространение трассера в поперечном сечении ЭМ за ДР охватывает не более 11 ячеек вокруг точки инъекции, что обусловлено меньшей перемешивающей способностью пластинчатой ДР, а также тем, что ТВС имеет раздвинутый пучок твэлов.

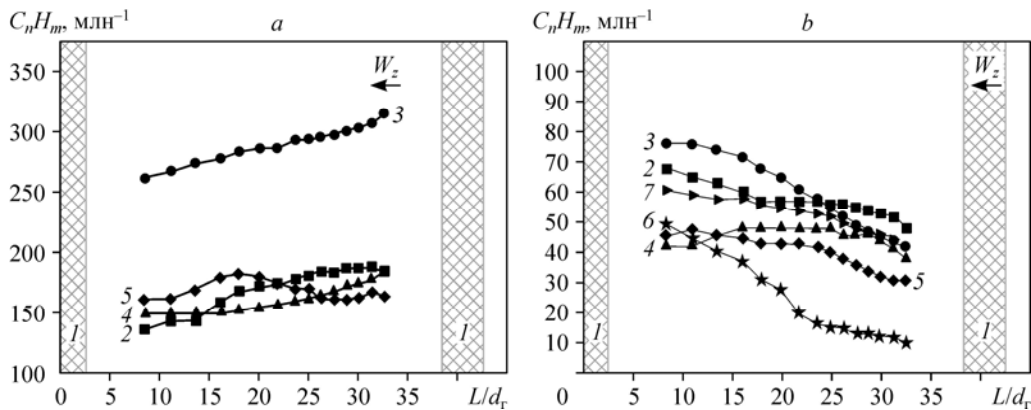


Рис. 10. Распределение концентрации трассера по длине экспериментальной модели за поясом дистанционирующей решетки.

I — дистанционирующая решетка, a — ячейки № 80 (2), 86 (3), 92 (4), 93 (5);
 b — ячейки № 70 (2), 71 (3), 85 (4), 87 (5), 101 (6), 102 (7).

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 [11].

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 строится расчетная область. В поперечном сечении эта область содержала все 168 ячеек модели ТВС реактора КЛТ-40С, включая твэлы, стержни выгорающего поглотителя и центральный вытеснитель.

Ячейки расчетной области были разделены на четырнадцать характерных типов. Разделение ячеек основывалось на величине гидравлического сопротивления, обусловленного различной конфигурацией пластин ДР. В продольном сечении ТВС реактора КЛТ-40С была разбита на тридцать два 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 сделать следующие выводы.

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, имеет место совпадение характера расчетного и экспериментального распределений аксиальной скорости по длине ЭМ (рис. 11б), и при затеснении проходного сечения пластинами ДР наблюдается противоположный результат. Этот факт говорит о том, что ячейки с различными типами затеснения поперечного сечения имеют различное гидравлическое сопротивление, что не учтено в коде КАНАЛ.

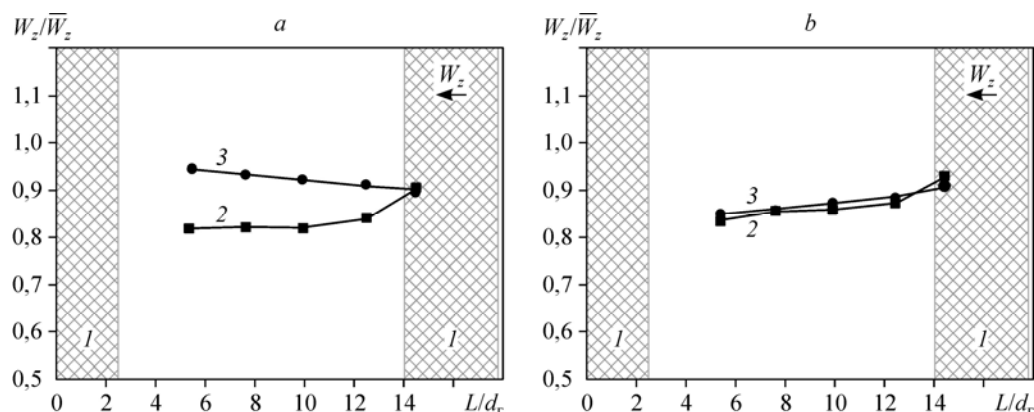


Рис. 11. Расчетное и экспериментальное распределения аксиальной скорости в ячейке, где пластины дистанционирующей решетки затесняют проходное сечение в виде треугольника в центре (а), и в ячейке, где пластины дистанционирующей решетки практически не препятствуют прохождению теплоносителя (б).

1 — дистанционирующая решетка, а: ячейка № 79 (2) — расчет, № 79 (3) — эксперимент;
 б: ячейка № 87 (2) — расчет, № 87 (3) — эксперимент.

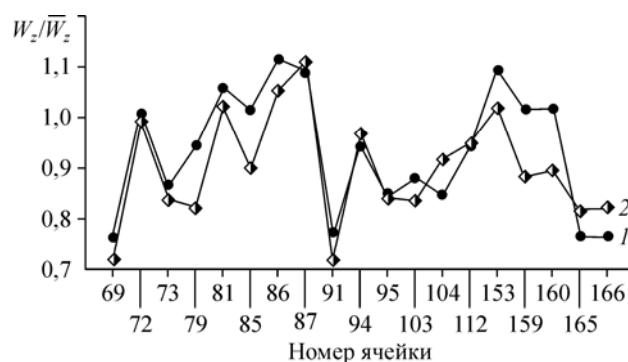


Рис. 12. Расчетное (1) и экспериментальное (2) распределения аксиальной составляющей вектора скорости в выходном сечении модели.

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).

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.

Список литературы

1. **Дмитриев С.М., Бых О.А., Панов Ю.К., Сорокин Н.М., Зверев Д.Л., Фарафонов В.А.** Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах. М.: Машиностроение, 2013. 415 с.
2. **Дмитриев С.М., Баринов А.А., Бородин В.Е., Хробостов А.Е.** К вопросу о методологии обоснования теплотехнической надежности активных зон водяных энергетических реакторов // Тр. Нижегородского гос. техн. ун-та 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 потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР // Атомная энергия. 2012. Т. 113, вып. 5. С. 252–257.
4. **Волков С.Е., Курдюмов А.С., Кашинский О.Н., Лобанов П.Д., Прибатурин Н.А.** Экспериментальное исследование влияния дистанционирующей решетки на структуру течения в ТВС реактора АЭС-2006 // Теплоэнергетика. 2013. № 1. С. 63–67.
5. **Лисенков Е.А., Лобачев С.М., Безруков Ю.А., Селезнев А.В., Прибатурин Н.А., Главный В.Г., Волков С.Е.** Исследование перемешивания теплоносителя в тепловыделяющей сборке реактора ВВЭР-1000 // Тяжелое машиностроение. 2012. № 9. С. 5–13.
6. **Tóth, S., Aszódi, A.** CFD analysis of flow field in a triangular rod bundle // Nuclear Engng and Design. 2010. Vol. 240. P. 352–363.
7. **Rehme K., Trippe G.** Pressure drop and velocity distribution in rod bundles with spacer grids // Nuclear Engng and Design. 1980. Vol. 62. P. 349–359.
8. **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.
9. **Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М.** Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов: Теоретические основы и физика процесса. М.: Энергоатомиздат, 1989.
10. **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. 2013. Т. 5, вып. 3. С. 98–107.
11. **Дмитриев С.М., Лукьянов В.Е., Самойлов О.Б.** Обоснование корреляции для расчета критического теплового потока в тепловыделяющих сборках альтернативной конструкции с перемешивающими решетками-интенсификаторами для ВВЭР-1000 // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2012. № 1. С. 99–108.

*Статья поступила в редакцию 12 марта 2015 г.,
после доработки — 9 июля 2015 г.*