

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 621.039

А.В. Варенцов¹, Д.В. Зяблицев¹, Д.Н. Солнцев¹, А.Н. Пронин¹, О.Н. Морозкин²

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА В ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРКАХ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ПЛАВУЧЕЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ОАО «ОКБМ Африкантов»²

Представлены результаты и анализ экспериментальных данных по исследованию локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя в ТВС реакторной установки плавучей атомной электростанции.

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

Введение

В настоящее время в России ведется строительство плавучей атомной электростанции (ПАТЭС). Данный проект относится к числу инновационных разработок российской энергетики и не имеет аналогов в мире. ОАО «ОКБМ Африкантов» занимается реализацией проекта атомной энергетической установки малой мощности для плавучей атомной электростанции. Проект ПАТЭС позволит российской атомной промышленности предлагать зарубежным заказчикам уникальную технологию в сегменте реакторов малой и средней мощности.

Важной характеристикой ПАТЭС является возможность ее базирования в труднодоступных районах и использования для выработки электричества и тепла. Размещение плавучих атомных теплоэлектростанций наиболее целесообразно в районах, где отсутствуют топливно-энергетические ресурсы или их доставка сопряжена с большими трудностями, в так называемых зонах децентрализованного энергоснабжения (Крайний Север, Дальний Восток России, островные государства Азиатско-Тихоокеанского региона и др.) [1].

Энергоисточником ПАТЭС является реакторная установка (РУ) КЛТ-40С. Требования к ядерным энергетическим установкам обуславливают необходимость обеспечения КЛТ-40С эксплуатационной надёжности и безопасности, а также высоких показателей эффективности работы.

Активная зона данной РУ кассетная и состоит из шестигранных ТВС. Разработанная в ОАО «ОКБМ Африкантов» ТВС для активных зон реактора КЛТ-40С должна соответствовать международным стандартам и требованиям [2]. Для внедрения данной конструкции в активную зону ядерного реактора, необходимо провести комплекс исследовательских работ по обоснованию теплотехнической надёжности данной тепловыделяющей сборки. В связи с этим экспериментальное исследование особенностей формирования локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя в пучках твэлов ТВС при использовании дистанционирующих решеток является актуальной задачей.

Экспериментальный стенд и методика проведения исследований

Основным методом изучения гидродинамики сборок твэлов и активных зон реакторов в целом является экспериментальное исследование масштабных и полноразмерных моделей кассет и активных зон на аэро- и гидродинамических стендах [3]. Поэтому исследования локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя проводились на аэродинамическом экспериментальном стенде (рис. 1) на масштабной модели.

Экспериментальная модель, представляющая собой ТВС реактора КЛТ-40С, выполнена в полном геометрическом подобии и состоит: из шестигранного чехла, 78-ми цилиндрических твэлов-имитаторов, шести цилиндрических СВП-имитаторов, устройства фиксации датчика, трех поясов дистанционирующих решеток.

Выходная часть экспериментальной модели представлена на рис. 1.

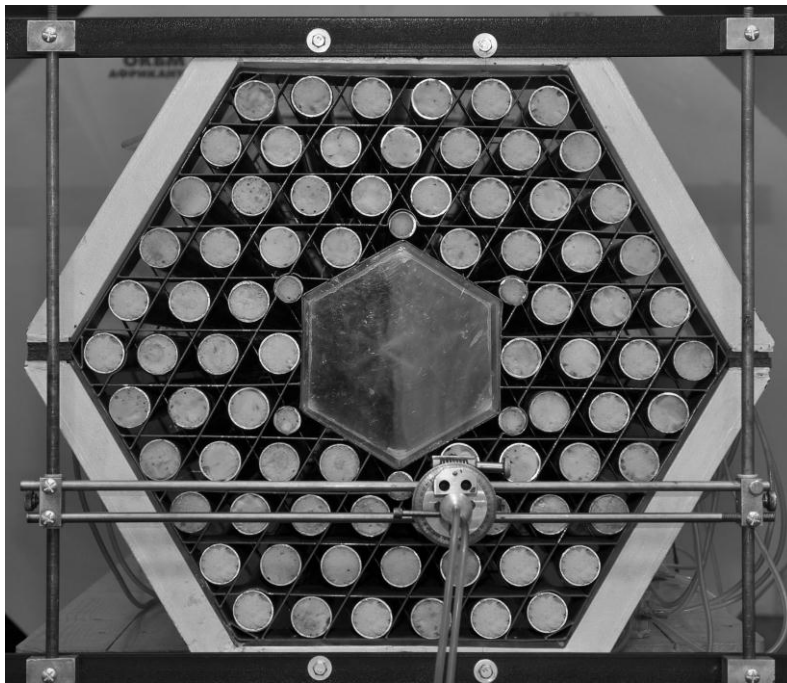


Рис. 1. Выходная часть экспериментальной модели

Исследования локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя заключались в измерении модуля вектора скорости пятиканальным пневмометрическим зондом (рис. 2) внутри трубного пучка экспериментальной модели. Пятиканальный зонд позволяет производить замеры (в среднем около 50 точек) в каждой из ячеек в поперечном сечении исследуемого участка ЭМ.



Рис. 2. Чувствительная часть пятиканального пневмометрического зонда

Для получения полной информации о трехмерном течении потока исследования локальной гидродинамики теплоносителя проводились в трех характерных областях: стандартной области (рис. 3, а), области вытеснителя (рис. 3, б) и периферийной области (рис. 3, в). Каждая область включала в себя определенное количество ячеек, которые разбивались на зоны измерения. В каждой из таких зон замеры проводились в 19 сечениях по длине ЭМ.

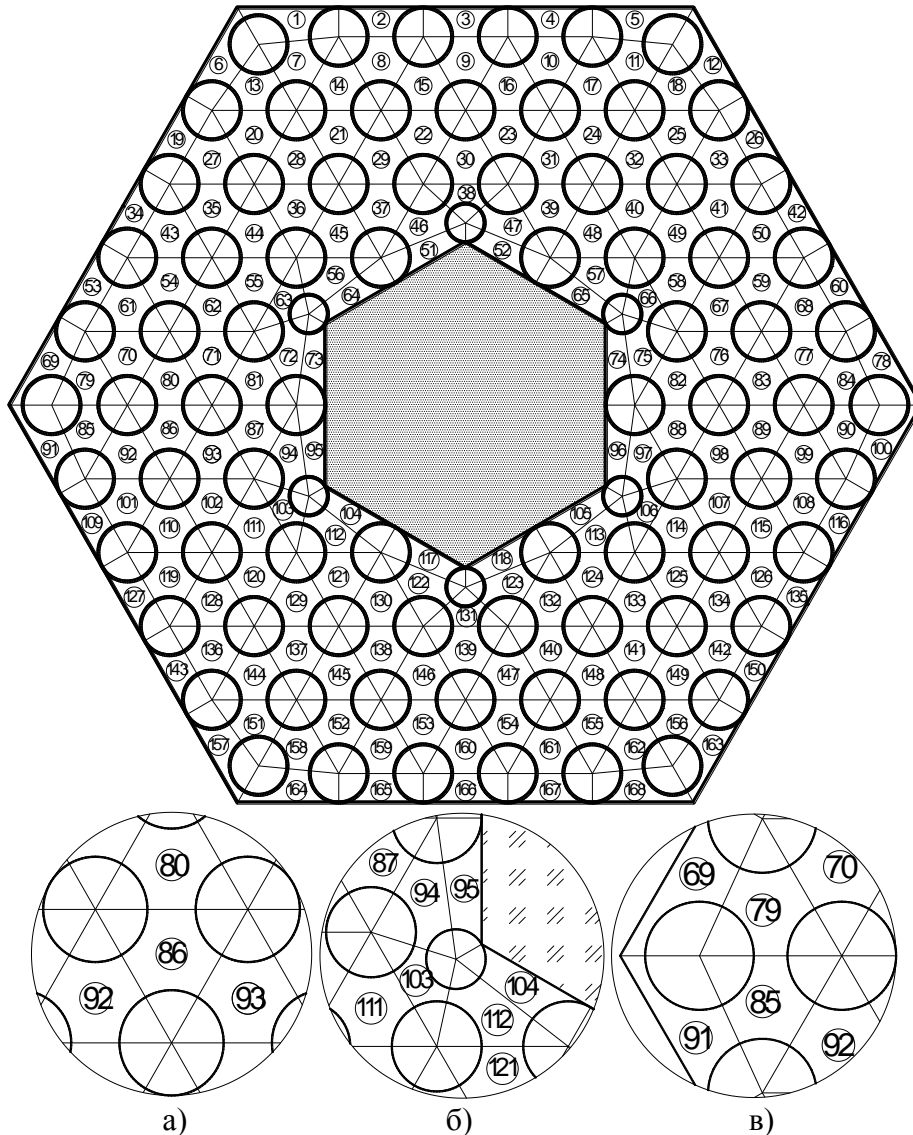


Рис. 3. Расположение ячеек в поперечном сечении экспериментальной модели: а – стандартная область; б – область вытеснителя; в – периферийная область

Результаты экспериментальных исследований локальных полей скорости в модели ТВС реактора КЛТ-40С

Экспериментальные исследования локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя проводились на масштабной модели ТВС реактора КЛТ-40С при числах $Re = 90600$. Цель данных исследований заключалась в измерении проекций вектора скорости на оси X , Y , Z в трех характерных областях модели, включающих в себя определенное количество ячеек:

- стандартная область (ячейки № 80;86;92;93);
- область вытеснителя (ячейки № 87;94;95;103;104;111;112;121);
- периферийная область (ячейки № 69;70;79;85;91;92).

Для получения наиболее полного представления о характере течения теплоносителя в рассмотренных областях построены картограммы изотак относительных скоростей W_x / \bar{W} , W_y / \bar{W} и W_z / \bar{W} для исследуемых областей. Такая форма представления экспериментальных данных позволяет качественно определить основные закономерности течения теплоносителя.

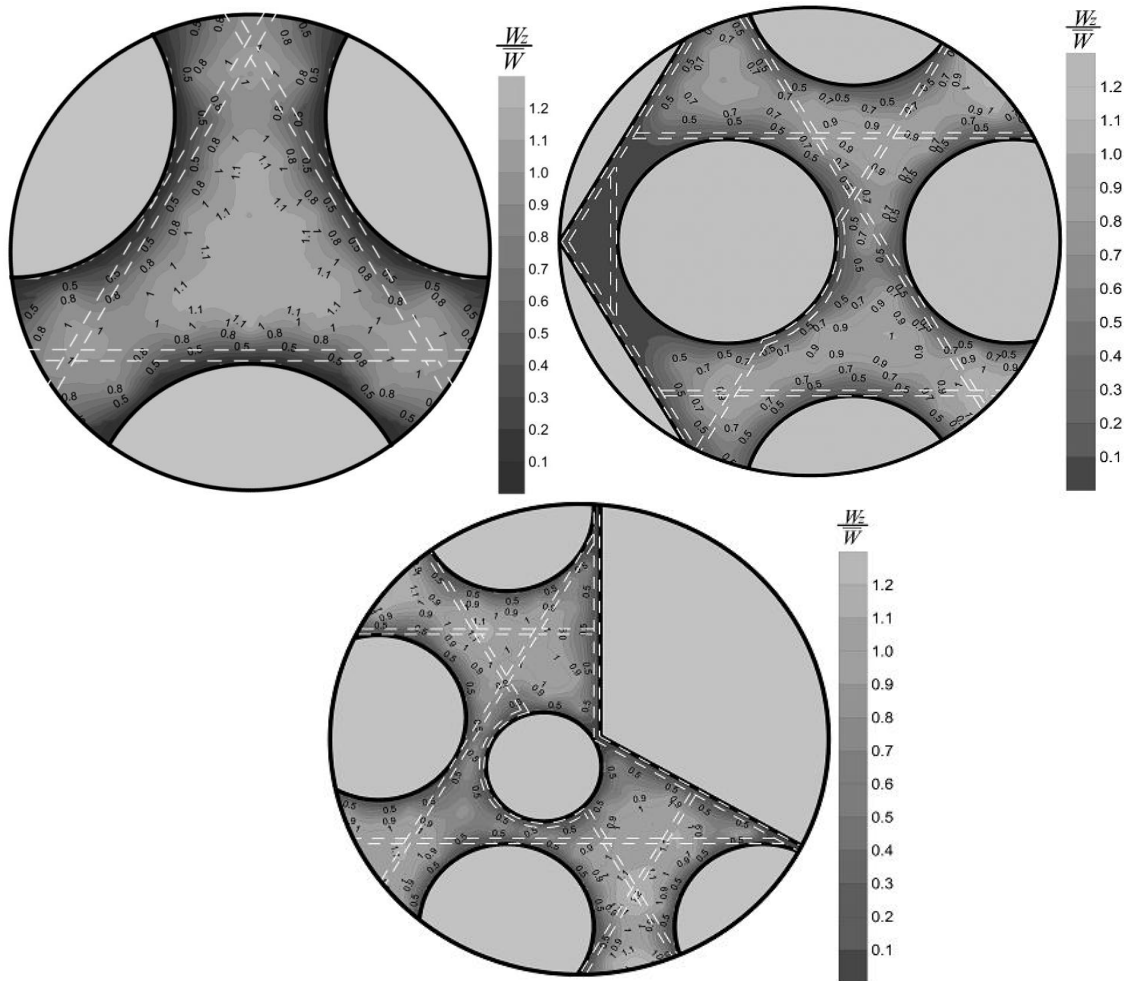


Рис. 4. Картограммы распределения относительных скоростей W_x / \bar{W} , W_y / \bar{W} и W_z / \bar{W} для зон стандартной, периферийной области и зоны вытеснителя в выходном сечении экспериментальной модели

Анализ гидродинамических величин в трех выбранных областях за ДР ЭМ позволяет определить общие закономерности движения теплоносителя за дистанционирующими решетками ТВС реактора КЛТ-40С. При анализе гидродинамических величин следует учитывать, что каждая область включает в себя определенный набор ячеек, отличающихся площадями проходных сечений.

По результатам распределения проекций абсолютной скорости в стандартной области, области вытеснителя и периферийной области выявлено, что во всех ячейках ТВС реактора КЛТ-40С поток теплоносителя преимущественно носит осевой характер. Значения относительных поперечных скоростей W_x / \bar{W} , W_y / \bar{W} не превышают 5%. Это обуславливается тем, что дистанционирующие решетки, состоящие из пластин, вносят незначительные возмущения в поток теплоносителя, а также тем, что ТВС реактора КЛТ-40С имеет раздвинутый пучок твэлов. Полученные результаты подтверждают также малую интенсивность межъячеечного массообмена потока теплоносителя за дистанционирующими решетками КЛТ-40С.

Из картограмм распределения проекций абсолютной скорости в стандартной области (яч. № 86) видно, что в центре ячейки № 86 наблюдается ярко выраженное ядро потока, имеющее треугольную форму (рис. 4). Значение аксиальной составляющей вектора скорости в ядре потока достигает максимального значения ($W_z / \bar{W} = 1,1 \div 1,2$) от среднерасходной скорости.

В ячейках области вытеснителя значения аксиальной составляющей вектора скорости W_z / \bar{W} распределились следующим образом:

- в ячейках № 95, 104 значения $W_z / \bar{W} = 0,90 \div 1,07$;
- в ячейках № 94, 112 значения $W_z / \bar{W} = 0,95 \div 1,10$;
- в ячейке № 103 значения $W_z / \bar{W} = 0,83 \div 1,00$.

По результатам распределения аксиальной составляющей вектора скорости W_z / \bar{W} в ячейках области вытеснителя ТВС видно, что значения W_z / \bar{W} на (10–15)% меньше, чем в стандартных ячейках.

Для периферийных ячеек было получено следующее распределение значений аксиальной составляющей вектора скорости W_z / \bar{W} :

- в ячейках № 69, 91 значения $W_z / \bar{W} = 0,67 \div 0,84$;
- в ячейках № 79, 85 значения $W_z / \bar{W} = 0,81 \div 1,00$.

В результате распределения аксиальной составляющей вектора скорости W_z / \bar{W} в периферийной области значения W_z / \bar{W} на 20–30% меньше, чем в стандартных ячейках.

Экспериментальные исследования локальных полей скорости в стандартной области, области вытеснителя и периферийной области позволили определить распределение расхода теплоносителя, что играет важную роль при расчете температурного поля в активной зоне реактора.

При анализе расходов через характерные области необходимо учитывать площади проходных сечений ячеек, входящих в данные области.

Ввиду конструктивных особенностей пластинчатой дистанционирующей решетки ТВС реактора КЛТ-40С её пластины по-разному затесняют проходное сечение стандартных ячеек. Ячейка №86 относится к первому варианту затеснения пластинами ДР поперечного сечения, пластины дистанционирующей решетки располагаются в виде «треугольника» (рис. 5, а). Ячейки №80, 92, 93 относятся ко второму варианту затеснения пластинами ДР поперечного сечения, пластины дистанционирующей решетки располагаются в виде «звезды» (рис. 5, б).

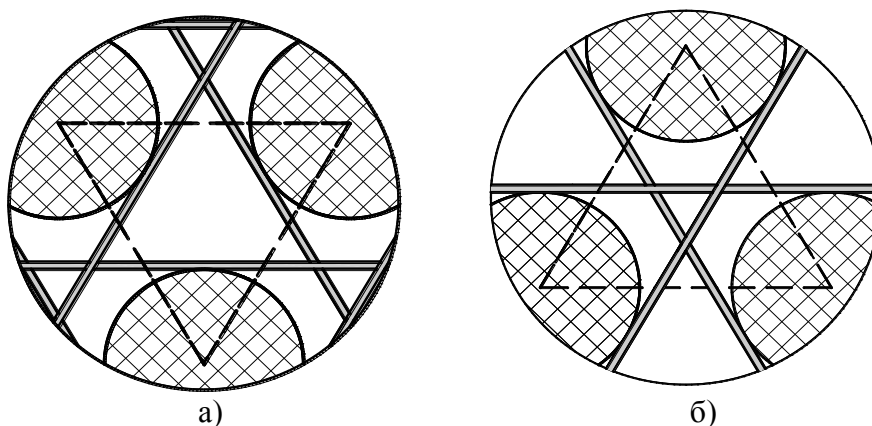


Рис. 5. Затеснение поперечного сечения стандартной ячейки пластинами ДР в виде: а – «треугольника»; б – «звезды»

Сравнение расходов в стандартных ячейках двух вариантов затеснения поперечного сечения пластинами ДР показало, что через ячейки первого варианта затеснения поперечного сечения расход теплоносителя на 10% больше, чем через ячейки второго варианта затеснения поперечного сечения.

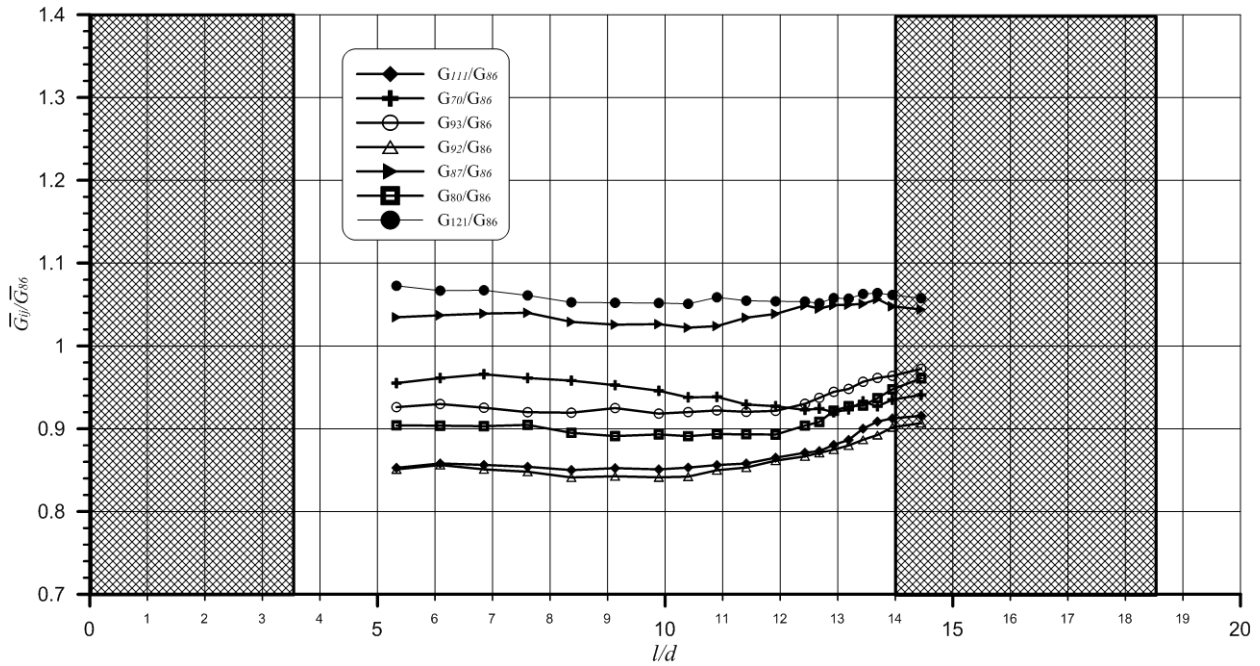


Рис. 6. Отношение распределения расхода теплоносителя через стандартные ячейки с двумя вариантами затеснения поперечного сечения пластинами ДР

Для сравнения расходов теплоносителя через стандартную область и область вытеснителя, а также периферийную область значения расходов в ячейках данных областей отнеслись к значению расхода через стандартную ячейку №86.

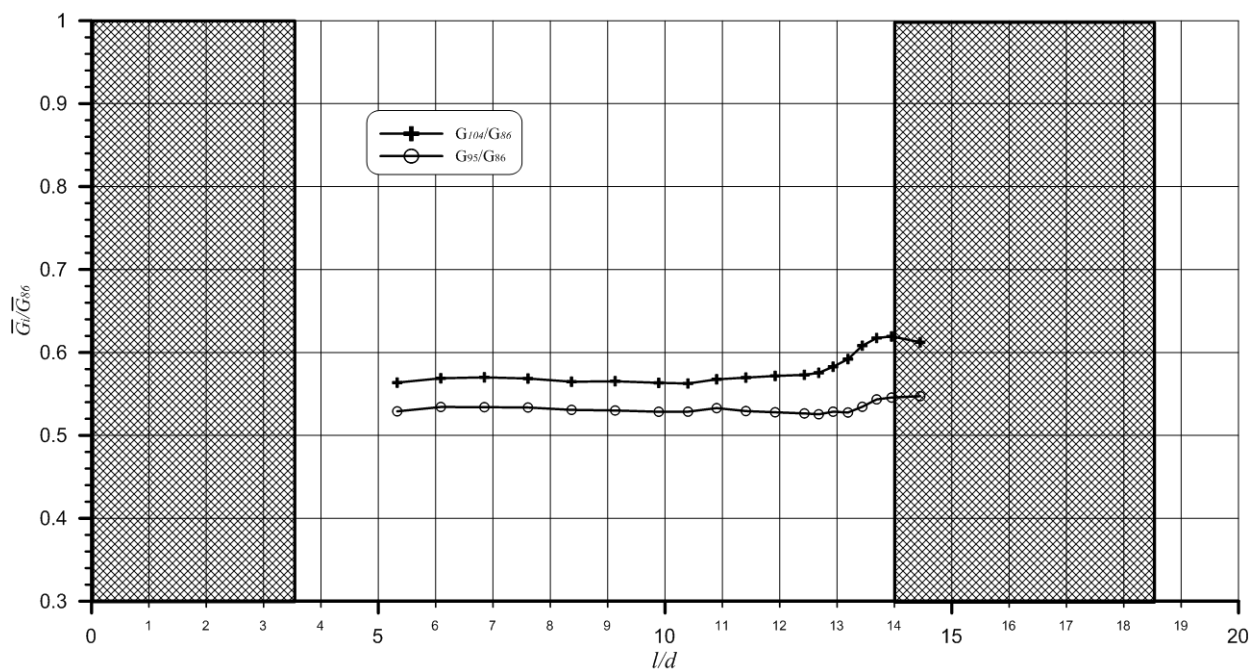


Рис. 7. Отношение распределения расхода теплоносителя через ячейки № 95, 104 к стандартной ячейке №86

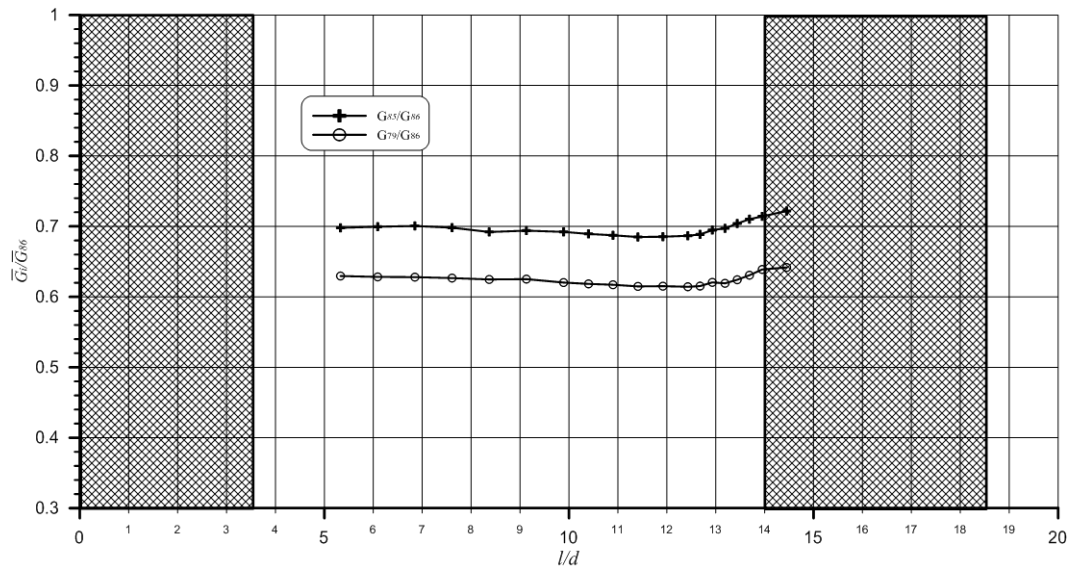


Рис. 8. Отношение распределения расхода теплоносителя через ячейки № 69, 91 к стандартной ячейке №86

В результате были получены следующие значения распределения расходов теплоносителя через область вытеснителя (ячейки №95,104) и через периферийную область (ячейки №69, 91). В ячейках области вытеснителя расход составляет 40% по отношению к расходу стандартной ячейки, в ячейках периферийной – 30% от расхода в стандартной ячейке.

Выводы

1. Определены характеристики локальной гидродинамики потока теплоносителя в ТВС реактора КЛТ-40С. По результатам исследований выявлены особенности течения теплоносителя за дистанционирующими решетками, а именно:

а) во всех ячейках ТВС реактора КЛТ-40С поток теплоносителя преимущественно носит осевой характер. Значения относительных поперечных скоростей W_x/\bar{W} , W_y/\bar{W} не превышают 5%;

б) в центрах стандартных ячеек, где пластины дистанционирующей решетки ТВС реактора КЛТ-40С затесняют проходное сечение ячейки в виде «треугольника», наблюдается ярко выраженное ядро потока, имеющее треугольную форму. Значение аксиальной составляющей вектора скорости в ядре потока достигает максимального значения $W_z/\bar{W} = 1,1\div 1,2$ от среднерасходной скорости;

в) значения аксиальной составляющей вектора скорости W_z/\bar{W} в ячейках области вытеснителя ТВС реактора КЛТ-40С на (10–15)% меньше значений W_z/\bar{W} в стандартных ячейках;

г) в периферийных ячейках значения аксиальной составляющей вектора скорости W_z/\bar{W} на (20–30)% меньше, чем в стандартных ячейках.

2. Анализ распределения расходов через характерные области модели ТВС реактора КЛТ-40С позволил выявить следующее:

а) через ячейки, где пластины дистанционирующей решетки располагаются в виде «треугольника», расход теплоносителя на 10% больше, чем через ячейки, где пластины дистанционирующей решетки располагаются в виде «звезды»;

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

Обобщена экспериментальная информация и создан банк данных для верификации

CFD-кодов и программ детального поочередного расчета активных зон с ТВС для реактора КЛТ-40С с целью уменьшения консерватизма в расчетах теплотехнической надежности активных зон.

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента РФ (грант №МК-3172.2011.8) и гранта Нижегородской области в сфере науки, технологий и техники.

Библиографический список

1. Расчетно-экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик теплоносителя в ТВС реакторной установки КЛТ-40С / Д.В. Доронков [и др.] // Энергия-2012: материалы региональной научно-технич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: в 8 т. Иваново. Т. 2. С. 23-26.
2. Экспериментальное исследование локального массообмена и оценка эффективности перемешивания дистанционирующих решеток в ТВС реактора КЛТ-40С / А.В. Варенцов [и др.] // Материалы XXXII Всерос. конф. по проблемам науки и технологий. – М.: МСНТ, 2012. С. 111-113.
3. Исследование массообменных характеристик и эффективности перемешивающих решеток ТВСА-АЛЬФА реакторов ВВЭР / С.С. Бородин [и др.] // Труды пятой Российской национ. конф. по теплообмену: в 8 т. М., 2010. Т. 1. С. 177-180.

*Дата поступления
в редакцию 06.08.2012*

A.V. Varentsov¹, D.V. Zyablitshev¹, D.N. Solntsev¹, A.E. Khrobostov¹, O.N. Morozkin²

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF FLOW HYDRODYNAMICS IN FUEL ASSEMBLIES OF FLOATING NUCLEAR POWERPLANT REACTOR

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
Joint stock company «OKBM Afrikantov»²

Purpose: Experimental research of local hydrodynamics of coolant in the KLT-40S nuclear reactor FA.

Design/methodology/approach: The main method of investigation of hydrodynamics in the nuclear reactor FA is an experimental research of full-size fuel assemblies and cores models on aero- and hydrodynamics stands. Researches of coolant local hydrodynamics are based on measurements of local velocity vectors with five-hole pressure probe inside experimental model.

Findings: Characteristics of local hydrodynamics coolant flow in KLT-40S reactor fuel assembly were defined. Features of coolant stream behind spacer grid were revealed. Experimental researches of local velocity fields in standard cells, cells around displacer and peripheral cells of FA allowed to define distribution of coolant expense in FA, what plays important role at calculation of a temperature field in core of the KLT-40S reactor

Research limitations/implications: The special databank was created basing on the experimental 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 and are used now by JSC OKBM Afrikantov.

Originality/value: Originality of this article is in local hydrodynamics of coolant research, and revealing features and conformity of coolant flow in the nuclear reactor FA to physical laws. Therefore we can prove heat engineering reliability of the KLT-40S reactor core.

Key words: nuclear reactor, fuel assembly, hydrodynamics of coolant, spacer grid.