

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 621.039

С.М. Дмитриев, А.В. Варенцов, Д.В. Доронков, М.А. Легчанов, Д.Н. Солнцев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕЖКАНАЛЬНОГО ОБМЕНА ТЕПЛОСИТЕЛЯ В ТВС РЕАКТОРА КЛТ-40С

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В работе представлены результаты экспериментальных и расчетных данных по исследованию локальных гидродинамических характеристик и межканального массообмена потока теплоносителя в модели ТВС реакторной установки плавучей атомной электростанции.

Ключевые слова: ядерный реактор, тепловыделяющая сборка, гидродинамика и массообмен теплоносителя, дистанционирующая решетка.

Введение

Строительство первой плавучей атомной теплоэлектростанции (ПАТЭС) мощностью 70 МВт с реакторными установками КЛТ-40С ведет ОАО «Концерн Росэнергоатом». Данный энергоисточник нового поколения, созданный на базе российских технологий атомного судостроения, предназначен для круглогодичного энергоснабжения районов Арктики и Дальнего Востока России, а также других изолированных, топливодефицитных районов в России и за рубежом.

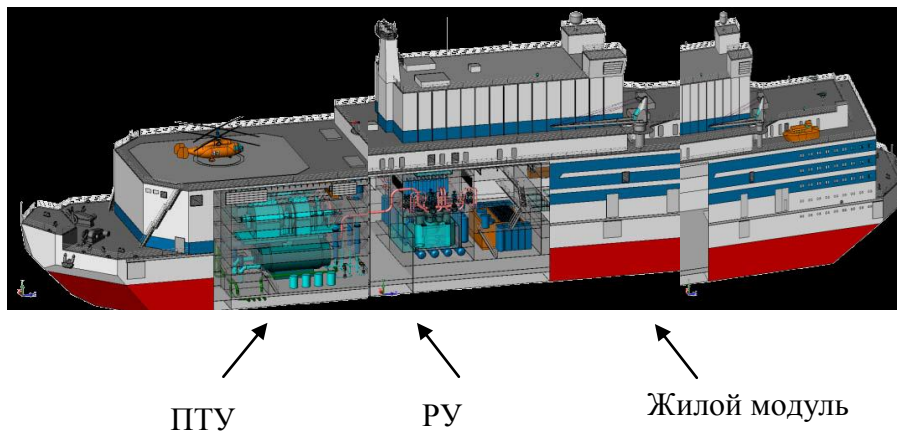


Рис. 1. Плавучий энергетический блок (ПЭБ)

Проектантом и комплексным поставщиком реакторной установки для ПАТЭС является ОАО «ОКБМ Африкантов». Одним из этапов обоснования работоспособности данной реакторной установки является комплекс исследований, направленных на изучение теплогидравлики в активной зоне. Данный тип работ представляет собой экспериментальное исследование особенностей формирования локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя в пучках твэлов ТВС.

Экспериментальный стенд

Исследования локальных характеристик гидродинамики и межъячеечного массообмена потока теплоносителя проводились на аэродинамическом стенде (рис. 2) методом диффузии примесей. Принцип проведения экспериментальных исследований заключался в том, что поток воздуха посредством радиального вентилятора высокого давления поступал в ресиверную емкость, двигался через расходомерное устройство и успокоительный участок, затем, пройдя через экспериментальную модель (ЭМ), выбрасывался в атмосферу. Трассер подавался через впускной зонд в ячейку пучка твэлов в начале исследуемого участка, после чего отборным зондом за исследуемым поясом дистанционирующей решетки (ДР) производился отбор газозадушной смеси для анализа распределения концентрации трассера по длине и поперечному сечению ЭМ [1].

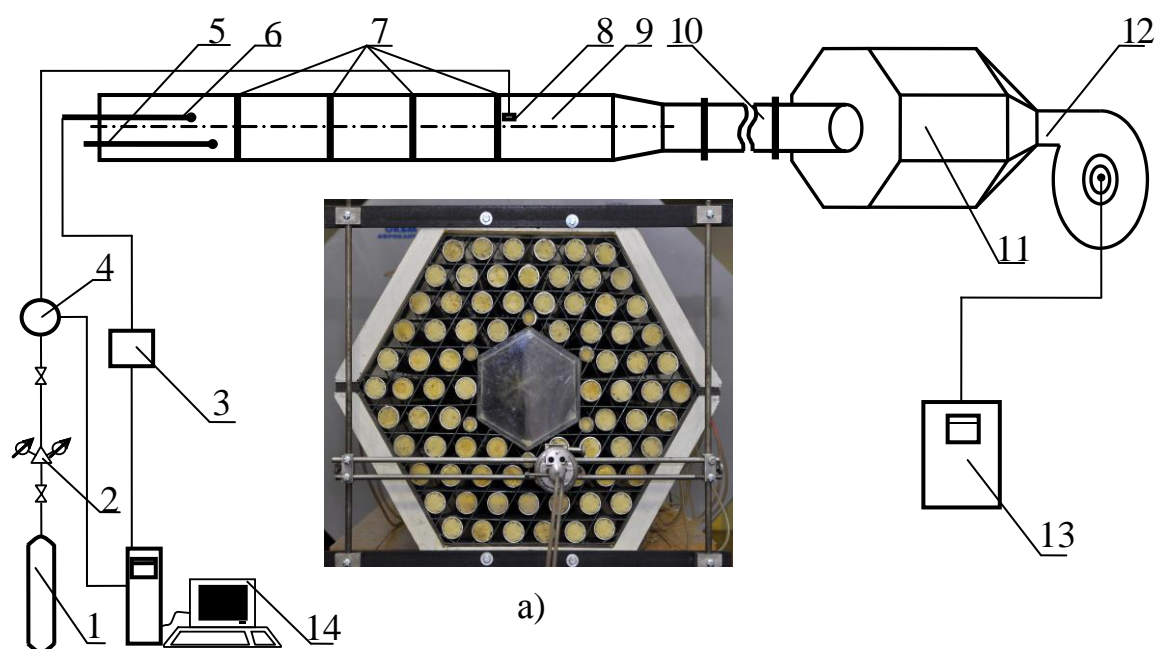


Рис. 2. Схема экспериментального стенда:

1 – газовый баллон; 2 – редуктор; 3 – модульный газоанализатор; 4 – регулятор расхода газа; 5 – пятиканальный пневмометрический зонд; 6 – отборный зонд; 7 – статические отборы; 8 – устройство ввода трассера в ячейку ЭМ; 9 – экспериментальная модель; 10 – успокоительный участок; 11 – буферная емкость; 12 – вентилятор высокого давления; 13 – преобразователь частоты; 14 – ЭВМ; а – выходное сечение экспериментальной модели ТВС реактора КЛТ-40С

Экспериментальная модель, входящая в состав стенда представляет собой масштабную модель ТВС реактора КЛТ-40С, выполненную в полном подобии натурной ТВС. Имеет длину 3 м и состоит из шестигранного чехла, 78 цилиндрических твэлов-имитаторов, шести цилиндрических СВП-имитаторов, трех поясов дистанционирующих решеток.

Измерительный комплекс

В состав измерительного комплекса входят: газоанализатор АДК-03Р, регулятор расхода газа EL-FLOW, отборный зонд, выполненный в виде трубки Пито-Прандтля и одновременно выполняющий функцию транспортного газопровода в газоанализатор, ПЭВМ с соответствующим программным обеспечением.

Для измерения концентрации углеводородов C_nH_m в газо-воздушной смеси использовался газоанализатор АДК-03Р, принцип работы которого основан на измерении величины

поглощения инфракрасного излучения в области длины волны 3,4 мкм. Диапазон измеряемых концентраций: 0...10000 ppm, погрешность измерения при этом с учетом индивидуальной градуировки равна ± 5 ppm (0...1000 ppm); $\pm 1,5\%$ (1000...10000 ppm). Величина 10000 ppm соответствует 1 объемному проценту газа трассера в газо-воздушной смеси.

Для поддержания заданного расхода газа использовался массовый расходомер EL-FLOW, который позволяет измерять и регулировать потоки газов в диапазонах от 0 до 5 л/мин. Погрешность при этом составляет не более 0,5%.

Представительность получаемых экспериментальных данных

Для обоснования представительности экспериментальных исследований массообменных и гидродинамических характеристик модели ТВС активной зоны реактора КЛТ-40С необходимо соблюдение равенства местного гидравлического сопротивления натуральных дистанционирующих решеток ТВС реактора КЛТ-40С и дистанционирующих решеток экспериментальной модели.

С этой целью был проведен ряд испытаний, направленных на определение режимов течения теплоносителя в экспериментальной модели, определение участков гидродинамической стабилизации потока и нахождение границ зон автомодельного течения теплоносителя.

В процессе работы экспериментального стенда на установившемся режиме течения замерялись перепады статического давления по длине модели, и для каждого из участков проводилось их сравнение. Стабилизированным считалось течение с постоянной величиной градиента статического давления.

В диапазоне чисел $Re=50000-90000$, что соответствует зоне автомодельности, коэффициент гидравлического сопротивления ДР составляет $\xi_{др} = 0,29$. Данное значение соответствует коэффициенту гидравлического сопротивления натурной решетки.

Кроме того, была проведена апробация методик проведения экспериментальных исследований для подтверждения достоверности получаемых результатов, определены погрешности измеряемых величин. Оценка погрешности измерения аксиальной составляющей скорости и концентрации проводилась на основе сравнения балансов расхода трассера и основного потока. Погрешности измеряемых величин не превышали 5%.

Методика проводимых исследований

Метод трассера основан на регистрации поперечного потока массы по некоторой переносимой субстанции (краски, соли, газа и т.д.) [2]. В качестве трассера использовался газ пропан, поскольку он обладает наиболее близкими к воздуху свойствами, возможностью быстрой и достаточно точной регистрации, что позволяет получать большие объемы данных в ограниченное время. Методика проведения экспериментальных исследований локального массообмена на экспериментальном стенде заключалась в следующем:

- поперечное сечение экспериментальной модели было разбито на ячейки, каждой из которых был присвоен свой индивидуальный порядковый номер;
- газовый трассер через впускной зонд подавался в стандартную ячейку ЭМ до пояса перемешивающей решетки по ходу течения потока теплоносителя. Далее с помощью отборного зонда производился замер концентрации трассера газоанализатором по центрам всех ячеек за поясом ДР в характерных сечениях по длине ЭМ;
- по полученным данным строились графики и картограммы зависимости распределения концентрации трассера от относительной координаты для характерных зон поперечного сечения ЭМ.

Результаты проводимых исследований

На основе полученных данных были построены графики и картограммы, позволяющие визуально оценить распределение трассера в поперечном сечении экспериментальной модели.

Рассмотрев, как изменяется значения концентрации трассера в зоне инъекции и в соседних ячейках (рис. 3), можно отметить, что посредством механизма турбулентного переноса, часть потока теплоносителя из каждой ячейки переходит в соседние ячейки.

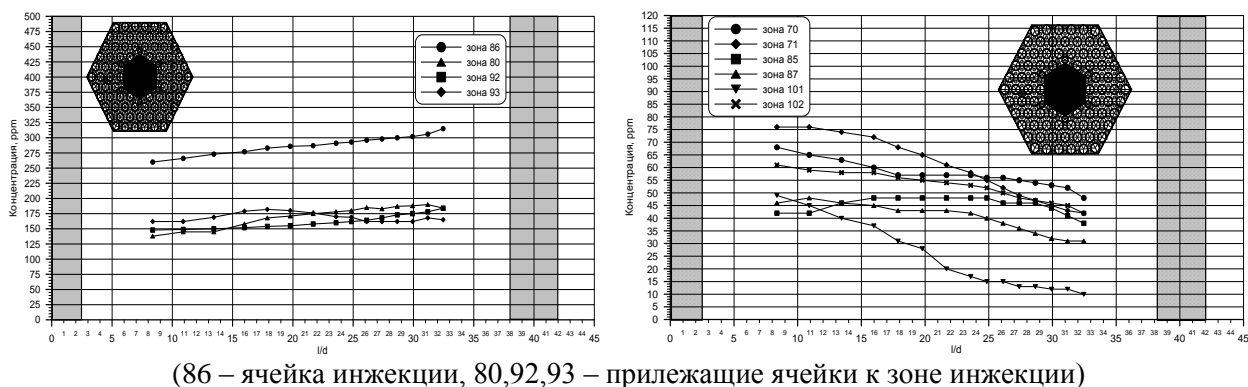


Рис. 3. Распределение концентрации трассера по длине экспериментальной модели за поясом дистанционирующей решетки

Следует отметить, что дистанционирующие решетки, состоящие из пластин, не приводят к интенсивному перемешиванию потока теплоносителя, так как распространение пропанового трассера в поперечном сечении ЭМ за дистанционирующей решеткой охватывает не более 11 ячеек вокруг точки инъекции (рис. 4). Это свидетельствует о низкой перемешивающей способности данной дистанционирующей решетки. С другой стороны, такая пластинчатая решетка имеет невысокое гидравлическое сопротивление.

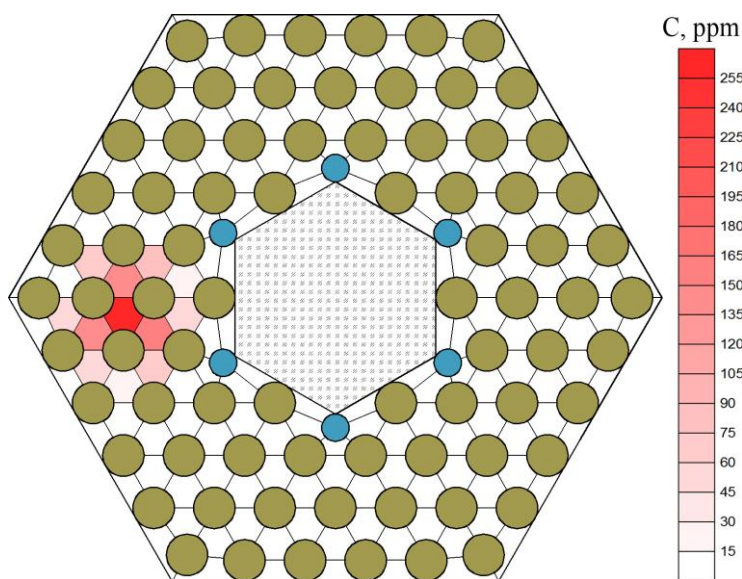


Рис. 4. Распределение концентрации трассера в выходном сечении экспериментальной модели ТВС реактора КЛТ-40С

Результаты расчетных исследований массообмена потока теплоносителя на экспериментальной модели ТВС реактора КЛТ-40С

Для анализа экспериментальных данных была разработана математическая модель распределения трассера, которая позволяет оценить значения коэффициента межканального обмена и тем самым количественно охарактеризовать перемешивающие свойства дистанционирующей решетки модели ТВС реактора КЛТ-40С.

ЭМ условно разбивалась по длине на слои, ее поперечное сечение разбивается на плоские элементарные ячейки. В результате можно представить себе каждый слой состоящим из объемных элементов, в основании которых находится плоская элементарная ячейка. При этом часть боковой поверхности элементов ограничена поверхностью имитаторов твэлов или стенками экспериментальной модели, а часть – совпадает с боковыми поверхностями соседних ячеек (элементов). Общие боковые поверхности элементов представляют собой плоские прямоугольные области.

Каждый элемент характеризуется определенным набором геометрических параметров: формой и площадью ячейки, находящейся в его основании, площадью его боковых поверхностей, граничащих с соседними элементами. Также каждый элемент характеризуется типом соседних элементов, граничащих с ним.

Объемные элементы можно разделить на семь типов по виду ячеек (I-VII), лежащих в их основании (рис. 5).

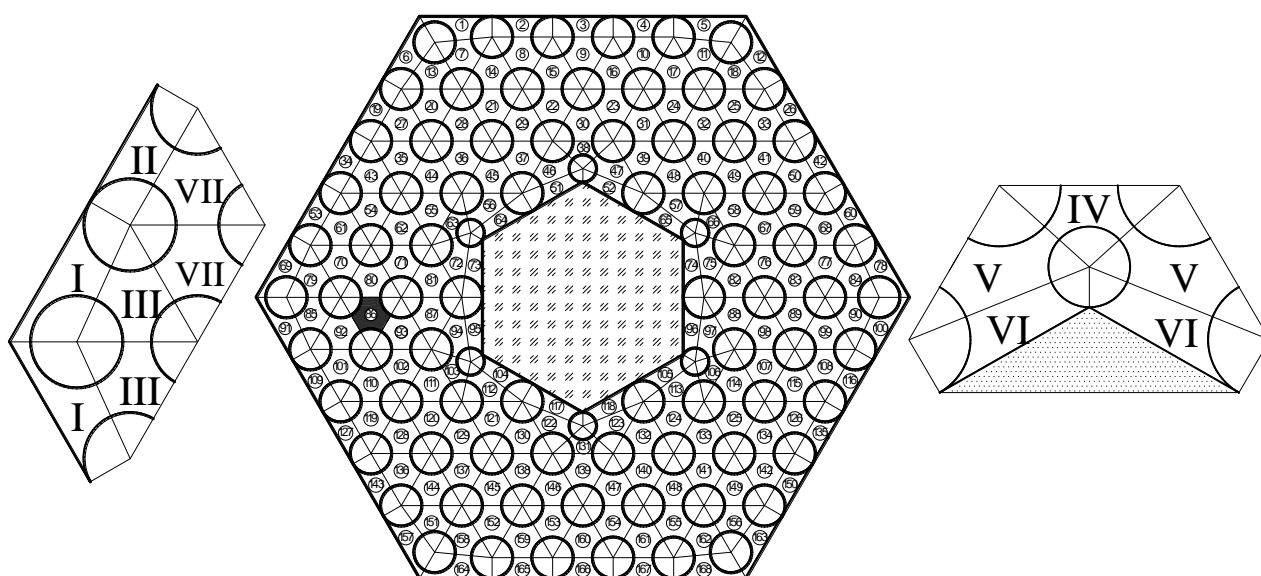


Рис. 5. Типы ячеек экспериментальной модели

При движении теплоносителя по ЭМ осуществляется как осевой, так и поперечный обмен массой между соседними элементами модели. Для определения поперечного обмена массой вводим коэффициент межканального обмена μ , м^{-1} как отношение поперечного потока массы на единицу длины канала к полному осевому потоку теплоносителя через ячейку G_i :

$$\mu = \frac{G_{ij}}{G_i}, \quad (1)$$

где G_{ij} - поперечный поток массы на единицу длины канала, G_i - полный осевой поток теплоносителя через ячейку.

Для нахождения распределения трассера по сечению и длине экспериментальной модели необходимо составить систему уравнений баланса массы трассера, переносимой потоком в осевом и поперечном направлениях. Для решения системы требуется задание значений концентраций трассера в первом слое.

Методом подбора определялись такие значения μ для каждого слоя, при которых значения концентрации трассера в ячейках при расчете были максимально близки к результатам эксперимента.

Для оценки эффективности ДР введем понятие эффективного коэффициента межканального обмена $\mu_{\text{эф}}$.

$$\mu_{\text{эф}} = K_{\text{эф}} \cdot \mu_{\text{гЛ}}, \quad (2)$$

где $K_{\text{эф}}$ – коэффициент, учитывающий влияние ДР на перемешивание теплоносителя, $\mu_{\text{гЛ}}$ – коэффициент межканального обмена в «гладком» пучке твэлов.

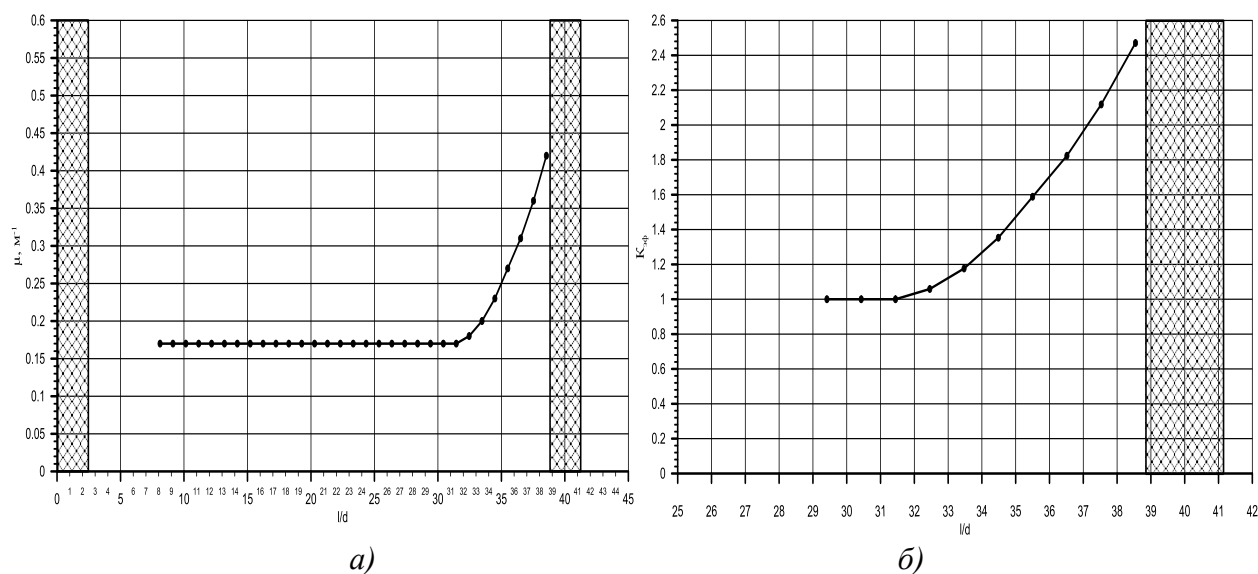


Рис. 6. Результаты расчетных исследований влияния ДР на перемешивание теплоносителя:
а - распределение значений коэффициента межканального обмена для ЭМ;
б - распределение по длине ЭМ коэффициента $K_{\text{эф}}$

Анализ распределения коэффициента межканального обмена по длине ЭМ показал, что начиная с расстояния $l/d = 7$ за решеткой значение коэффициента выходит на постоянный уровень. Это значение характеризует межканальный обмен массой в «гладком» пучке ЭМ.

Таким образом, максимальное значение коэффициента $K_{\text{эф}}$ составило 2,47, а длина затухания массообменных процессов, вызванных влиянием решетки, составляет $\Delta l/d = 6-7$.

Выводы

По результатам экспериментальных и расчетных исследований гидродинамики и массообмена в ЭМ за ДР были выявлены основные общие закономерности массообмена и движения потока теплоносителя за поясом ДР:

1. Посредством механизма турбулентного переноса часть поперечного потока теплоносителя из каждой ячейки переходит в соседние ячейки, смешиваясь при этом с основным осевым потоком.

2. Применение дистанционирующих решеток, состоящих из пластин, не приводит к интенсивному перемешиванию потока теплоносителя. Это обусловлено меньшей перемешивающей способностью пластинчатой дистанционирующей решетки, а также тем, что ТВС реактора КЛТ-40С имеет раздвинутый пучок твэлов. С другой стороны, такая пластинчатая решетка имеет «невысокое» гидравлическое сопротивление.

3. Наибольшее значение (максимум) эффективного коэффициента межканального массообмена для ДР наблюдается за решеткой на расстоянии $l/d = 38,5$ и соответствует значению $\mu = 0,42 \text{ м}^{-1}$, при этом область затухания возмущений массообменных характеристик за ДР составляет $\Delta l/d = 7 \div 8$.

Полученные результаты используются для расчета эффективности дистанционирующих решеток в разрабатываемых прикладных программах и являются базой данных при расчетах теплотехнической надежности активных зон реактора КЛТ-40С.

Библиографический список

1. **Варенцов, А.В.** Экспериментальные и расчетные исследования гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в модели ТВС реактора КЛТ-40С / А.В. Варенцов [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. – Казань: Научно-технический вестник Поволжья. 2013. №3. С. 114–119.
2. **Дмитриев, С.М.** Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР / С.М. Дмитриев [и др.] // Атомная энергия. Т. 113. Вып. 5. 2012. С. 252–257.

*Дата поступления
в редакцию 18.10.2013*

S.M. Dmitriev, A.V. Varentsov, D.V. Doronkov, M.A. Legchanov, D.N. Solntsev

**EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL MODELING INTER-CHANNEL
EXCHANGE OF NUCLEAR REACTOR FA KLT-40S**

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

Purpose: Experimental research and computational modeling 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 mass-transfer of coolant, spacer grid.