

ОБОСНОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИИ ДЛЯ РАСЧЕТА КРИТИЧЕСКОГО ТЕПЛООВОГО ПОТОКА В ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРКАХ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ КОНСТРУКЦИИ С ПЕРЕМЕШИВАЮЩИМИ РЕШЕТКАМИ-ИНТЕНСИФИКАТОРАМИ ДЛЯ ВВЭР-1000

С.М. Дмитриев*, В.Е. Лукьянов, О.Б. Самойлов****

**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород*

***ОАО «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова», г. Нижний Новгород*

Р

Представлены результаты экспериментальных исследований перемешивания теплоносителя и кризиса теплоотдачи в ТВСА-Т с комбинированными дистанционирующими и перемешивающими решетками-интенсификаторами на аэродинамическом и теплофизических стендах. На основании полученных результатов выполнено уточнение коэффициента межъячейкового перемешивания теплоносителя и разработана корреляция для расчета критического теплового потока. Обоснована применимость корреляции для расчета критического теплового потока в ТВСА-Т ВВЭР-1000.

Ключевые слова: тепловыделяющая сборка альтернативной конструкции, перемешивающие решетки-интенсификаторы, коэффициент перемешивания, кризис теплоотдачи, корреляция критического теплового потока.

Key words: alternative design fuel assembly, mixing spacer grids, mixing coefficient, departure from nucleate boiling, critical heat flux correlation.

ВВЕДЕНИЕ

ТВСА – тепловыделяющая сборка альтернативной конструкции для ВВЭР-1000 имеет жесткий каркас, формируемый шестью уголками жесткости и дистанционирующими решетками.

Уголкового конструктивная ТВСА имеет теплогидравлические положительные качества – невысокое гидравлическое сопротивление и более оптимальное для охлаждения твэлов распределение расхода по ячейкам за счет меньшего диаметра направляющего канала (НК) и наличия уголков жесткости, вытесняющих часть расхода из ненагруженного межкассетного пространства в ячейки ТВСА [1].

© С.М. Дмитриев, В.Е. Лукьянов, О.Б. Самойлов, 2012

Теплотехнические характеристики ТВСА подтверждены результатами экспериментальных исследований. ТВСА успешно эксплуатируется на 17-ти блоках ВВЭР-1000 Калининской АЭС, АЭС Украины и Болгарии [2, 3]. Внедрение ТВСА обеспечило улучшение технико-экономических и эксплуатационных характеристик топлива для ВВЭР-1000.

Проводится совершенствование ТВСА в целях повышения технико-экономических показателей и конкурентоспособности топлива для ВВЭР-1000 [4]. Разработана усовершенствованная модификация ТВСА с перемешивающими решетками-интенсификаторами – ТВСА-Т. Тепловыделяющая сборка ТВСА-Т характеризуется увеличенным до 510 мм шагом расположения и увеличенной до 35 мм высотой дистанционирующих решеток (ДР).

Конструкция перемешивающих решеток (ПР) – пластинчатая решетка с дефлекторами потока без функции дистанционирования твэлов. Расположение дефлекторов в ПР организовано таким образом, что обеспечивается «закрутка» потока вокруг твэлов.

В ТВСА-Т ПР применяются в составе комбинированных решеток (КДР). Комбинированная двухъярусная решетка состоит из ячейковой ДР и пластинчатой ПР, расположенных в одном ободке (рис. 1).

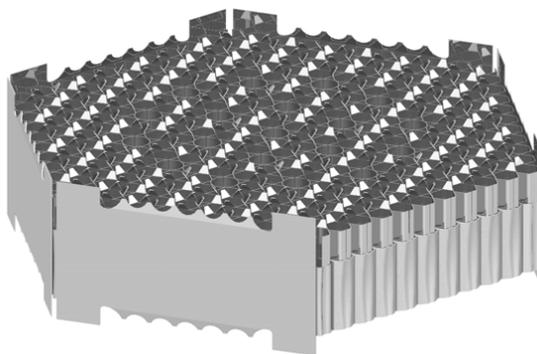


Рис. 1. Комбинированная дистанционирующая решетка

Исследование эффективности ПР и обоснование корреляции для расчета критического теплового потока (КТП) выполнялось совместно ОАО «ОКБМ Африкантов», ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского и НГТУ им. Р.Е. Алексеева при финансировании ОАО «ТВЭЛ» и включало в себя

- исследование перемешивающих свойств на крупномасштабных моделях методом «пропанового» трассера в НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
- исследование кризиса теплоотдачи и температуры теплоносителя на 19-стержневых моделях в ОАО «ОКБМ Африкантов» и ГНЦ РФ-ФЭИ;
- разработку и обоснование корреляции для расчета критического теплового потока в ТВСА-Т с перемешивающими решетками, верификацию ячейкового теплогидравлического кода КАНАЛ.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА АЭРОДИНАМИЧЕСКОМ СТЕНДЕ МЕТОДОМ «ПРОПАНОВОГО ТРАССЕРА»

На аэродинамическом стенде НГТУ выполнены исследования эффективности перемешивания теплоносителя на крупномасштабных моделях ТВСА-Т с ПР.

Стенд представляет собой разомкнутый контур с рабочим участком на выходе, через который газодувкой прокачивается воздух. Рабочий участок включает в себя

экспериментальную модель в шестигранном кожухе с устройствами подачи трассера и отбора пробы.

Для исследования межъячейкового массообмена использовался метод инъекции трассера. В качестве трассера применялся пропан, который подавался в заданные ячейки модели.

Исследования выполнены на 57-стержневой модели, включающей в себя фрагменты трех соседних ТВСА-Т (рис. 2).

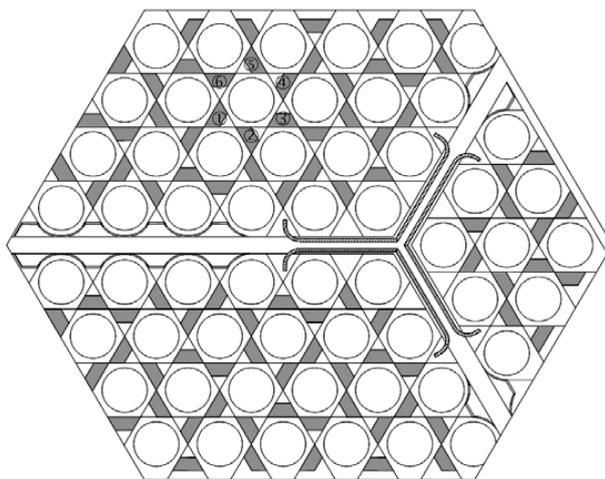


Рис. 2. Схема поперечного сечения 57-стержневой модели: ① – ячейка подачи трассера и измерения концентрации трассера; ② – ⑥ – ячейки измерения концентрации трассера

Модель ТВСА с ПР изготавливалась в масштабе 4,4:1, и по основным элементам, определяющим условия межъячейкового массообмена, геометрически подобна натурным. Длина модели составляет 3 м.

Представительность экспериментальных исследований на стенде обеспечивалась

- использованием масштабных фрагментов ТВСА-Т и фрагментов ДР и ПР;
- проведением исследований при параметрах теплоносителя, соответствующих автомодельному режиму течения теплоносителя (число Рейнольдса $Re \approx 90000$);
- использованием аттестованной системы измерения;
- применением апробированной методики измерений.

Проведенные исследования показали, что за перемешивающей решеткой в 6-ячейковых областях с расположением дефлекторов по схеме «закрутка» потока вокруг твэлов происходит винтообразное постепенно затухающее по длине течение воздуха, обеспечивающее эффективный конвективный массоперенос между ячейками этой области (рис. 3).

Длина участка модели за ПР, на котором конвективный перенос играет определяющую роль, составляет 330-440 мм (70-100 мм в пересчете на натурные условия). На большем расстоянии от ПР основным механизмом массообмена является турбулентный перенос, интенсифицированный дефлекторами решетки.

Расчетный анализ результатов исследований межъячейкового массообмена показал, что в модельной сборке на участке за ПР длиной ~860 мм (~200 мм в пересчете на натурные условия) коэффициент перемешивания в 7,0 – 8,0 раз больше коэффициента перемешивания в пучке твэлов без ПР.

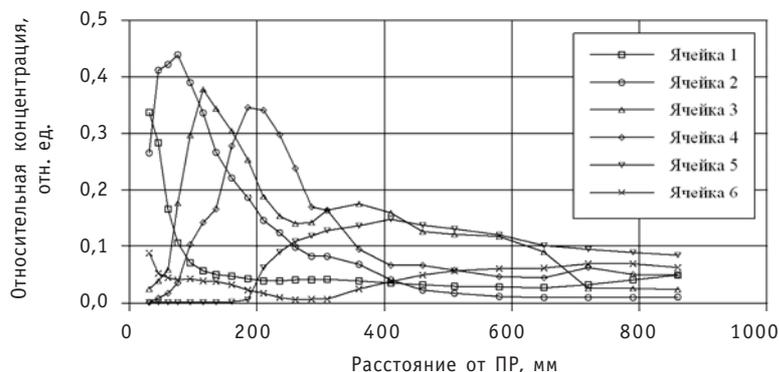


Рис. 3. Распределение концентрации трассера по длине экспериментальной модели

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИЗИСА ТЕПЛООТДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СТЕНДАХ

Исследование кризиса теплоотдачи и распределения температуры теплоносителя выполнялось на двух стендах в ОАО «ОКБМ Африкантов» и ГНЦ РФ-ФЭИ. Целью проведения исследований являлось определение эффекта увеличения критической мощности при использовании ПР и формирование массива экспериментальных данных для разработки корреляции КТП.

Экспериментальный стенд Л-186 ОКБМ включает в себя два замкнутых водяных контура: основной, рассчитанный на рабочее давление до 19,6 МПа, и вспомогательный, служащий для снятия тепла с основного контура. Давление в обоих замкнутых контурах создается воздушным компрессором и подпиточными насосами.

Основные характеристики стенда Л-186:

- давление теплоносителя до 19,6 МПа;
- температура теплоносителя на входе до 310°C;
- расход теплоносителя до 6 кг/с.

Стенд СВД-2 ГНЦ РФ-ФЭИ включает в себя три контура. Тепло основного контура передается промежуточным контуром в контур оборотного водоснабжения, из которого тепло в капельной градирне передается атмосферному воздуху.

Основные характеристики стенда СВД-2:

- давление теплоносителя до 25,5 МПа;
- температура теплоносителя на входе до 450°C;
- расход теплоносителя до 27 кг/с.

Все узлы, арматура и трубопроводы стендов, имеющие контакт с теплоносителем, изготовлены из коррозионно-стойкой стали.

В качестве теплоносителя использовалась дистиллированная вода.

Экспериментальные модели представляли собой электрообогреваемые пучки имитаторов твэлов. Электрическое напряжение к моделям ТВС подводилось в верхней и нижней частях экспериментальных моделей по медным токоподводящим участкам.

Представительность экспериментальных исследований на теплофизических стендах обеспечивалась

- использованием моделей ТВС с натурными геометрическими характеристиками элементов;
- использованием фрагментов натурной КДР;
- проведением исследований при натуральных параметрах теплоносителя;
- использованием аттестованной системы измерения;
- применением апробированной методики измерений.

Исследования на стенде Л-186 проведены на шести 19-стержневых моделях ТВСА-Т, на стенде СВД-2 – на четырех 19-стержневых моделях ТВСА-Т, включая модели с радиальной и аксиальной неравномерностью энерговыделения.

Диапазон режимных параметров, в котором выполнены исследования кризиса теплоотдачи, следующий:

- давление теплоносителя 9,0–18,0 МПа;
- температура теплоносителя на входе 150–310°C;
- массовая скорость теплоносителя 500–5500 кг/(м²·с).

В результате проведенных исследований кризиса теплоотдачи получено, что критическая мощность модели ТВСА-Т на 10–15% выше критической мощности модели ТВСА.

Сопоставление критической мощности 19-стержневых моделей ТВСА-Т и ТВСА с центрально-симметричным радиальным и равномерным аксиальным энерговыделением, исследованных на стенде Л-186, при давлении 15,7 МПа и температуре на входе в модель 290°C представлено на рис. 4.

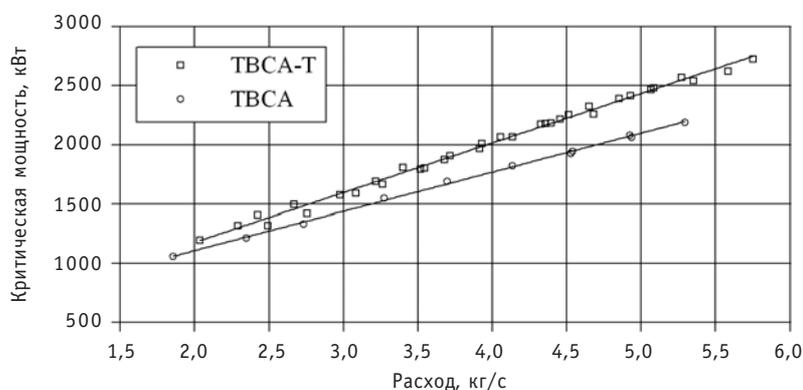


Рис. 4. Зависимость критической мощности от расхода теплоносителя

В результате исследований распределения температуры на выходе моделей ТВС с центрально-симметричным радиальным энерговыделением получено, что при использовании ПР в модели ТВСА-Т происходит практически полное выравнивание температуры по сечению модели в отличие от модели ТВСА, где разность температуры в центре и на периферии составляет $\approx 10\%$ от среднего подогрева в сборке.

Сопоставление температуры теплоносителя в ячейках на выходе 19-стержневых моделей ТВСА-Т и ТВСА с центрально-симметричным радиальным и равномер-

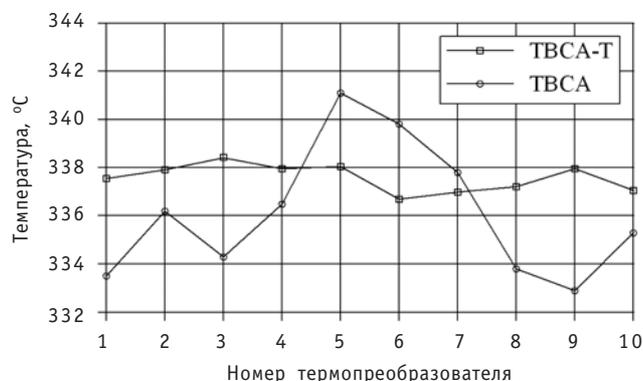


Рис. 5. Распределение температуры теплоносителя в ячейках экспериментальной модели

ным аксиальным энерговыделением, исследованных на стенде Л-186, при давлении 15,7 МПа, температуре на входе в модель 290°C, расходе 5,7 кг/с и мощности 1650 кВт представлено на рис. 5. Схема расположения термопреобразователей в ячейках экспериментальной модели показана на рис. 6.

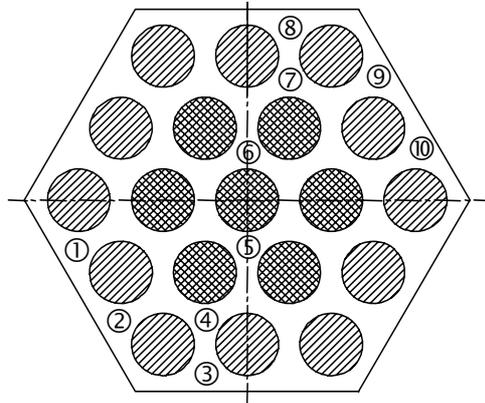


Рис. 6. Схема расположения термопреобразователей в ячейках экспериментальной модели

УТОЧНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МЕЖЪЯЧЕЙКОВОГО ОБМЕНА

В настоящее время в ячейковых теплогидравлических кодах, используемых при обосновании теплотехнических характеристик и запаса до кризиса теплоотдачи активных зон, для учета тепло- и массообмена используется эмпирический коэффициент межъячейкового обмена.

В программе КАНАЛ коэффициент межъячейкового обмена между стандартными ячейками на единицу длины определяется по соотношению [5]

$$K_{\text{ТО}}^{\text{СТ}} = \frac{0,03}{d_{\text{ТВ}} \cdot \text{Re}_{\text{ТВС}}^{1/12}}, \quad (1)$$

где $\text{Re}_{\text{ТВС}}$ – число Рейнольдса при средних параметрах теплоносителя в ТВС; $d_{\text{ТВ}}$ – наружный диаметр твэла, м.

Коэффициент турбулентного обмена $K_{\text{ТО}}$ кода КАНАЛ связан с коэффициентом тепловой диффузии TDC соотношением

$$TDC = \frac{w'}{w} = K_{\text{ТО}} \cdot \frac{f}{\delta}, \quad (2)$$

где w' – скорость теплоносителя в поперечном направлении, м/с; w – скорость теплоносителя в аксиальном направлении, м/с; f – площадь проходного сечения ячейки, м²; δ – зазор между соседними твэлами, м.

Среднее значение коэффициента межъячейкового перемешивания в пучках твэлов, дистанционируемых решетками без смесительных элементов, обосновано и составляет 1,12 м⁻¹ (коэффициент тепловой диффузии $TDC = 0,012$).

Определение и обоснование коэффициента межъячейкового обмена для ТВСА-Т с КДР выполнено на основании анализа результатов исследований эффективности перемешивания на крупномасштабных моделях ТВСА-Т трассерным методом, а также распределения температуры на 19-стержневой модели на теплофизическом стенде.

Для учета повышения тепло- и массообмена в пучках твэлов с ПР в коде КАНАЛ используется эффективный коэффициент межъячейкового обмена $K_{\text{эфф}}$, равный отношению коэффициента перемешивания в пучке твэлов с ПР к коэффициенту

перемешивания в пучке твэлов с ДР без смесительных элементов, рассчитываемому по соотношению (1).

Эффективный коэффициент межъячейкового обмена определялся с учетом необходимости обеспечения минимального отклонения расчетных и экспериментальных значений локальных параметров для всей серии экспериментальных режимов. Для определения средней эффективной величины коэффициента межъячейкового обмена использовался метод наименьших квадратов. При этом для различных значений $K_{эфф}$ рассчитывалась суммарная величина квадратов отклонения расчетных и экспериментальных значений температуры в ячейках для всей серии экспериментальных режимов:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{\frac{1}{N_p - 1} \cdot \frac{1}{N_{тп} - 1} \cdot \sum_{j=1}^{N_p} \sum_{i=1}^{N_{тп}} \left(\frac{t_i^{расч} - t_i^{эксп}}{\overline{\Delta t}} \right)_j^2}, \quad (3)$$

где N_p – количество экспериментальных режимов; $N_{тп}$ – количество термопреобразователей, установленных в ячейках; $t^{расч}$ – расчетное значение температуры; $t^{эксп}$ – экспериментальное значение температуры; $\overline{\Delta t}$ – средний подогрев теплоносителя в экспериментальной сборке.

Графическая зависимость $S_{\Sigma} = f(K_{эфф})$ представлена на рис. 7.

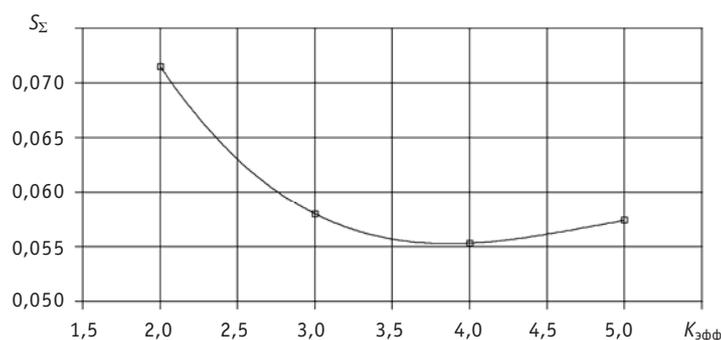


Рис. 7. Зависимость суммарной величины квадратов отклонений от эффективного коэффициента обмена

Получено, что по данным исследований на водяном теплофизическом стенде минимальная величина S_{Σ} имеет место при увеличении коэффициента межъячейкового обмена на длине пролета 510 мм в 3,8 раза по сравнению со значением, рассчитываемым по соотношению (1).

Этот результат подтверждается результатами исследований на аэродинамическом стенде с использованием «пропанового трассера». Величина коэффициента межъячейкового обмена в ТВСА-Т на длине пролета 510 мм в 3,5–4,0 раза больше, чем в ТВСА.

С учетом полученной по результатам статистического анализа погрешности расчета локальных температур теплоносителя по программе КАНАЛ для проведения теплогидравлических расчетов и обоснования теплотехнической надежности ТВСА-Т ВВЭР-1000 принята консервативная величина коэффициента межъячейкового обмена. Значение коэффициента межъячейкового обмена для ТВСА-Т с КДР на длине 510 мм принято в три раза большим по сравнению со значением для пучков твэлов с ДР без смесительных элементов (коэффициент тепловой диффузии $TDC = 0,036$).

РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИИ ДЛЯ КРИТИЧЕСКОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

В настоящее время в отечественной практике отсутствуют корреляции для расчета критического теплового потока в ТВСА с перемешивающими решетками-интенсификаторами. Наличие увеличенного шага расположения ДР и использование ПР в ТВСА-Т с учетом полученных результатов исследований потребовало разработки новой корреляции для расчета КТП.

Область применения корреляции КТП выбрана на основании опыта анализа безопасности АЭС с ВВЭР-1000 и соответствует важным для анализа безопасности режимам с минимальным коэффициентом запаса до кризиса теплоотдачи, включая режимы работы установки на двух, трех и четырех петлях:

- давление теплоносителя 13,0–17,0 МПа;
- массовая скорость теплоносителя 1000–4000 кг/(м²·с);
- относительная энтальпия теплоносителя –0,1–+0,3.

Разработка и обоснование корреляции КТП включали в себя несколько этапов, основными из которых являются

- формирование массива экспериментальных данных;
- выбор вида (формы) корреляции;
- оптимизация коэффициентов, учитывающих влияние отдельных параметров;
- анализ отклонений экспериментальных данных от расчетных значений, исключение ошибочных результатов расчета, возможных аномальных отклонений и др.;
- определение окончательных погрешностей корреляции;
- обоснование погрешности расчета КТП в составе поячейкового кода КАНАЛ.

Для разработки и обоснования корреляции были использованы результаты исследований КТП, полученные на моделях ТВСА-Т, которые включают в себя экспериментальные данные по кризису теплоотдачи в основных ячейках ТВСА-Т: стандартной ячейке, ячейке около НК, ячейке около уголка.

После предварительного анализа данных, выявления режимов с повышенными отклонениями и их исключения для разработки корреляции КТП был сформирован массив из ≈700 значений КТП и локальных параметров теплоносителя в ячейках.

Расчет локальных параметров теплоносителя в ячейках проводился по программе КАНАЛ, аттестованной в Ростехнадзоре РФ.

С учетом имеющегося опыта обобщений результатов исследований кризиса теплоотдачи для корреляции КТП была принята зависимость в виде полинома с эмпирическими коэффициентами. В результате получена следующая зависимость для расчета критического теплового потока в ТВСА-Т:

$$q_{кр} = B_0 \cdot (1 - B_1 \cdot x + B_2 \cdot P_1 + B_3 \cdot x^2 + B_4 \cdot P_1^2 + B_5 \cdot x \cdot P_1 + B_6 \cdot x \cdot W_1 + B_7 \cdot P_1 \cdot W_1) \cdot (1 + B_8 \cdot P_1^{B_9} \cdot W_1^{B_{10}}) \cdot P_1^{B_{11}} \cdot W_1^{B_{12}} \cdot F_{SC} \cdot F_F \quad (4)$$

где B_0 – B_{12} – эмпирические коэффициенты; x – относительная энтальпия теплоносителя; $P_1 = P/10$; $W_1 = \rho w/1000$; P – давление теплоносителя, МПа; ρw – массовая скорость теплоносителя, кг/(м²·с); F_{SC} – поправочный коэффициент, учитывающий геометрические характеристики ячеек.

Форм-фактор для корреляции имеет вид

$$F_F = \left[\frac{C}{q_z \cdot [1 - \exp(-C \cdot L_z)]} \int_0^{L_z} q(z) \cdot \exp(-C \cdot (L_z - z)) dz \right]^{-1}, \quad (5)$$

где $C = C_0 \cdot (1-x)^{C_1} \cdot \left(\frac{P}{10}\right)^{C_2}$ – эмпирический коэффициент, 1/м; q_z – тепловой поток в расчетном сечении; $q(z)$ – тепловой поток в сечении с координатой z ; l_z – координата расчетного сечения, м; C_0 – C_2 – эмпирические коэффициенты.

Эмпирические коэффициенты полиномов B_0 – B_{12} и C_0 – C_2 определены из условия минимального значения среднеквадратичного отклонения расчетных и экспериментальных значений КТП.

Обоснование корреляции для ТВСА-Т выполнено с использованием полного массива экспериментальных данных, полученных на моделях ТВСА-Т. Общее количество экспериментальных точек, входящих в область применения корреляции, составляет ≈ 900 (в том числе ≈ 50 экспериментальных точек в области отрицательных паросодержаний).

В результате сопоставления расчетных и экспериментальных значений КТП для полного массива данных получены следующие погрешности:

- среднеарифметическое отклонение $\bar{\Delta} = 0,1\%$;
- среднеквадратичное отклонение $\bar{\sigma} = 10,0\%$.

Погрешность расчета КТП по корреляции для ТВСА-Т в составе кода КАНАЛ, соответствующая одностороннему интервалу 95% при доверительной вероятности 95%, $\Delta_{corr} = \bar{\Delta} + k_{95/95} \cdot \bar{\sigma} = 17,2\%$ ($k_{95/95} \approx 1,71$ – для одностороннего интервала и количества экспериментальных точек $n \approx 900$).

Выполненное сопоставление расчетных и экспериментальных данных позволяет обосновать применение корреляции для расчета КТП в ТВСА-Т с перемешивающими решетками-интенсификаторами.

Сравнение КТП, рассчитанных по корреляции для ТВСА-Т и корреляции Безрукова Ю. А. [6] при давлении 15,7 МПа и относительной массовой скорости 4000 кг/(м²·с), представлено на рис. 8.

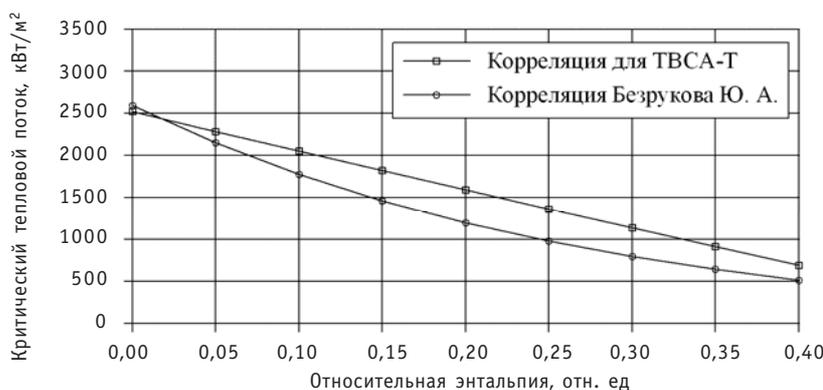


Рис. 8. Зависимость критического теплового потока от относительной энтальпии теплоносителя

ВЫВОДЫ

Выполнен комплекс экспериментальных исследований для определения эффективности использования перемешивающих решеток-интенсификаторов теплообмена и обоснования корреляции для расчета КТП. В результате проведенных исследований получено, что применение ПР позволяет существенно повысить критические тепловые нагрузки ТВСА-Т и улучшить условия охлаждения твэлов по сравнению с ТВСА без перемешивающих решеток.

На основании полученных экспериментальных результатов выполнено уточнение коэффициента межъячейкового перемешивания теплоносителя, разработана корреляция для расчета критического теплового потока. В результате сопоставления расчетных и экспериментальных данных по КТП выполнено обоснование применения корреляции для расчета КТП в ТВСА-Т с перемешивающими решетками-интенсификаторами.

Применение перемешивающих решеток в составе тепловыделяющей сборки ТВСА-Т позволит решить задачу обоснования эксплуатации загрузок с увеличенной ураноемкостью в перспективных топливных циклах с уменьшенной утечкой нейтронов, характеризующихся увеличенной предельной тепловой нагрузкой на твэлы.

Литература

1. *Самойлов О.Б., Фальков А.А., Шипов Д.Л., Богряков В.Г., Сорокин Н.М., Дмитриев С.М.* Теплогидравлические и гидродинамические исследования характеристик ТВС альтернативной конструкции ВВЭР-1000 // Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Физика ядерных реакторов». – 2004. – Вып. 2. – С. 47-55.
2. *Фальков А.А., Самойлов О.Б., Куприянов А.В., Лукьянов В.Е., Морозкин О.Н., Шипов Д.Л.* Расчетные и экспериментальные исследования теплогидравлических характеристик ТВСА ВВЭР-1000/Сб. докладов VI Международной конференции «WWER fuel performance, modeling and experimental support». – Albena, Bulgaria, 2005.
3. *Самойлов О.Б., Кайдалов В.Б., Романов А.И., Фальков А.А., Молчанов В.Л., Ионов В.Б., Аксенов В.И., Канышев М.Ю., Лупишко А.Н.* Технические характеристики и результаты эксплуатации ТВСА ВВЭР-1000/Сб. трудов V Международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». – Подольск, 2007.
4. *Самойлов О.Б., Фальков А.А., Лукьянов В.Е., Шипов Д.Л., Долгов А.Б., Ефанов А.Д., Пометько Р.С.* Расчетно-экспериментальные исследования в обоснование перемешивающих решеток-интенсификаторов для ТВСА ВВЭР-1000/Сб. тезисов докладов «Теплофизика 2008». – Обнинск, 2008.
5. *Полянин Л.Н.* Тепло- и массообмен в пучках стержней при продольном обтекании турбулентным потоком жидкости // Атомная энергия. – 1969. – Т. 26. – Вып. 3.
6. *Безруков Ю.А., Астахов В.И., Брантов В.Г.* Экспериментальные исследования и статистический анализ данных по кризису теплообмена в пучках стержней для реакторов ВВЭР // Теплоэнергетика. – 1976. – № 2. – С. 80-82.

Поступила в редакцию 20.11.2011

A slider bearing working in the medium of the heavy liquid metal coolants is one of the main elements which influence the efficiency of the main circulating pumps in the reactor loops with HLMS.

The operating efficiency of the slider bearing is mainly determined with the correct choice of its constructive relation: a relative annular gap, relative width, angle of contact.

The results of the experimental research have shown that the difference between hydraulic characteristics of water and HLMS coolants in the experimental plot «throttle-annular gap» exists. It makes the usage of the traditional lubricating fluid in the methods of analysis of the hydrostatic sliding bearings for the pumps in the HLMS incorrect.

УДК 621.039.526

Calculations and Experimental Investigation of Irradiation Heat Rate in BOR-60 Reactor \A.V. Varivtsev, I.Yu. Zhemkov, O.V. Ishunina, Yu.V. Naboyschikov, V.A. Neverov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 8 pages, 2 tables, 4 illustrations. – References, 6 titles.

Calculations and experimental investigation of irradiation heat rate in reactor BOR-60 reveals drawbacks of modern calculational methods. Paper propose algorithm for irradiation heat rate calculations, which allows to eliminate these drawbacks.

УДК 621.039.543: 621.039.524.44

The Substantiation of the Correlation for Critical Heat Flux Calculation for Alternative Design Fuel Assemblies with Mixing Spacer Grids in VVER-1000 \S.M. Dmitriev, V.E. Lukyanov, O.B. Samoylov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 10 pages, 8 illustrations. – References, 6 titles.

The results of the experimental investigations of coolant mixing and departure from nucleate boiling in TVSA-T with combined spacer grids and mixing grids on aerodynamic and thermal test facilities are presented. As a result of the obtained experimental data, the determination of mixing coefficient was carried out and the CRT-1 correlation for the critical heat flux calculation was developed. The applicability of correlation for critical heat flux calculation for TVSA-T VVER-1000 was substantiated.

УДК 621.039.534.6

The Method Based on Electromagnetic Sensor for Measuring of Sodium Flow Rate in a Heat Pipe \N.I. Loginov, A.S. Mikheev, A.A. Mukhlinin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 8 pages, 5 illustrations. – References, 6 titles.

The electromagnetic sensor design and method of liquid flow measuring in the vertical sodium heat pipe 100 mm diameter and 10 m length at operating temperature 550–650°C are described. The heat pipe was supplied with capillary structure only in the evaporation zone, i.e. it was a thermosyphon with nonseparated opposite flows of liquid and vapor.

Magnetic field of the sensor was produced by permanent magnet, made of thermostable alloy, which is efficient up to 600 oC. Flow measurements at three cross sections of the heat pipe, at four «points» of circumference of each section, were carried out. Significant fluctuations of the local flow rate values were observed. Maximum amplitude of the fluctuations exceeds the average value of the flow rate up to 2-3 times. Negative values of the local flow rate were observed. It means that liquid sodium flowed against the gravity force, and this indicates that the liquid sodium entrainment caused by vapor counter-flow, the speed of which was about 80 m/s, took place.

УДК 621.039.517

The Intensification of Mass Transfer in LWR Rods Bundles by Cellular Mixing Grids \P.V. Markov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 9 pages, 4 tables, 5 illustrations. – References, 6 titles.

The CFD-models of 7-rods and 19-rods bundle with mixing grid was developed. The flow field in rods bundles was investigated. A series of CFD analyses were performed to obtain hydraulic and mixing properties of mixing cellular grids.