

УДК 621.039

С.М. Дмитриев¹, О.Б.Самойлов², В.Е. Лукьянов², О.Н. Морозкин²**АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПЕРЕМЕШИВАЮЩИХ
РЕШЕТОК-ИНТЕНСИФИКАТОРОВ ТЕПЛООБМЕНА В ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ
СБОРКАХ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ КОНСТРУКЦИИ РЕАКТОРОВ ВВЭР-1000**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева¹,
ОАО «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова»²

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 основе полученных результатов выполнено уточнение коэффициента межъячейкового перемешивания теплоносителя и разработана корреляция для расчета критического теплового потока. Показана высокая эффективности применения комбинированных решеток в ТВСА-Т в реакторах ВВЭР-1000.

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

Введение

Тепловыделяющая сборка альтернативной конструкции (ТВСА) для реакторов ВВЭР-1000 имеет жесткий каркас, формируемый шестью уголками жесткости и дистанционирующими решетками.

Угловая конструкция ТВСА, с точки зрения реакторной теплогидравлики, имеет положительные качества: невысокое гидравлическое сопротивление, 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].

Теплотехнические характеристики ТВСА подтверждены опытом успешной эксплуатации на 17 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 увеличенными до 510 мм шагом расположения и 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, чтобы обеспечивать закрутку потока вокруг ТВЭЛов.

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

Исследование эффективности и теплогидравлическое обоснование применения ПР выполнялось совместно ОАО «ОКБМ Африкантов», ГНЦ РФ ФЭИ им. А.И. Лейпунского и НГТУ им. Р.Е. Алексева и включало:

- исследование перемешивающих свойств на крупномасштабных моделях методом пропанового трассера в НГТУ им. Р.Е. Алексева;

- исследование кризиса теплоотдачи и температуры теплоносителя на 19-стержневых моделях в ОАО «ОКБМ Африкантов» и ГНЦ РФ-ФЭИ;
- разработка и обоснование корреляции для критического теплового потока (КТП) в ТВСА-Т с ПР и уточнение методики расчета на основе полученных результатов исследований, верификация ячейкового кода «КАНАЛ».

С использованием уточненной методики выполнен анализ теплотехнических характеристик ТВСА-Т с ПР в составе активной зоны ВВЭР-1000.

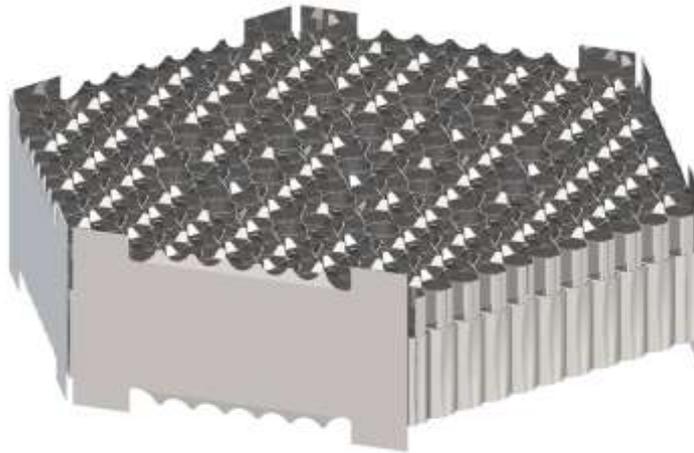


Рис. 1. Комбинированная дистанционирующая решетка

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 гидравлически разомкнутый контур с рабочим участком на выходе, через который вентилятором высокого давления прокачивается воздух. Рабочий участок включает в себя экспериментальную модель в шестигранном кожухе с устройствами подачи трассера и отбора пробы.

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

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

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

Представительность экспериментальных исследований на стенде обеспечивалась:

- использованием масштабных фрагментов ТВСА и фрагментов ДР и ПР;
- проведением исследований при параметрах теплоносителя, соответствующих автомобильному 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 массообмен между ячейками этой области (рис. 3).

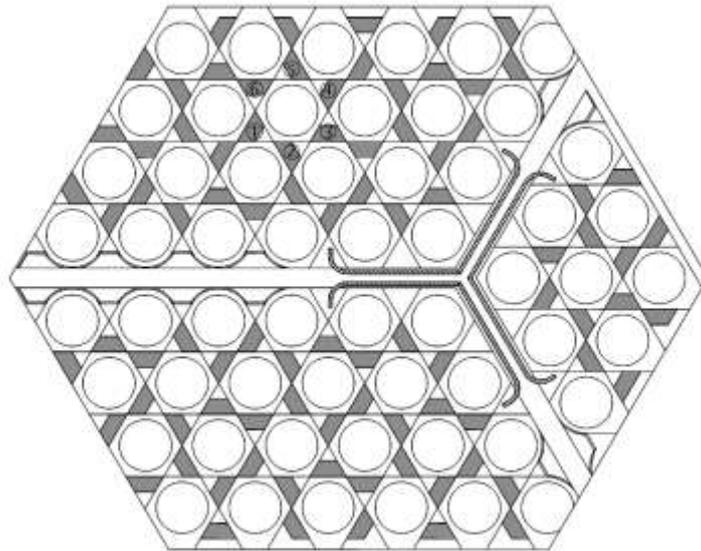


Рис. 2. Схема поперечного сечения 57-стержневой модели:
 ① – ячейка подачи трассера и измерения концентрации трассера;
 ② - ⑥ – ячейки измерения концентрации трассера

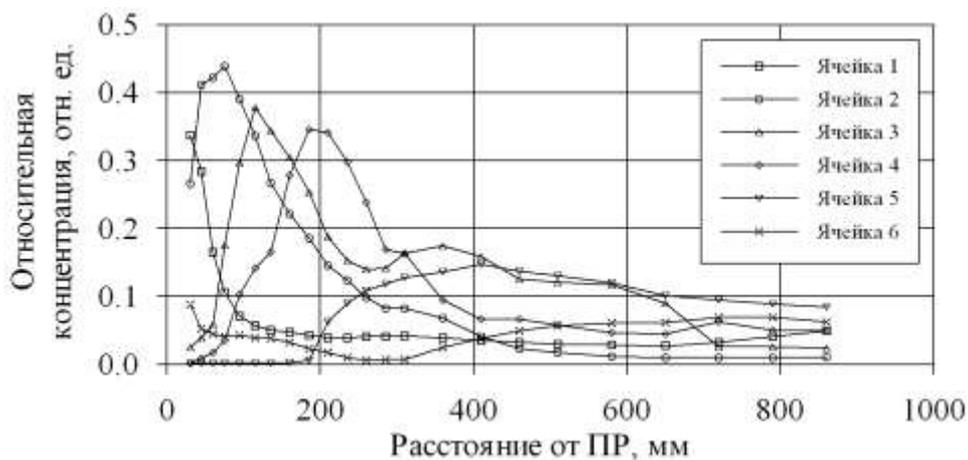


Рис. 3. Распределение концентрации трассера по длине экспериментальной модели

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 межячейкового 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.

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 два замкнутых водяных контура:

- основной контур, рассчитанный на рабочее давление до 19,6 МПа;
- вспомогательный контур, 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 °С; |
| – расход теплоносителя | до 6 кг/с. |

Стенд СВД-2 ГНЦ РФ-ФЭИ включает 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 °С; |
| – расход теплоносителя | до 27 кг/с. |

Все узлы, арматура и трубопроводы стендов, имеющие контакт с теплоносителем, изготовлены из коррозионностойкой стали.

В качестве теплоносителя использовалась дистиллированная вода.

Экспериментальные модели представляли собой электрообогреваемые пучки имитаторов ТВЭЛов. Электрическое напряжение подводилось в верхней и нижней частях экспериментальных моделей ТВС 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:

| | |
|--------------------------------------|----------------------------------|
| – давление теплоносителя | 9,0-18,0 МПа; |
| – температура теплоносителя на входе | 150-310 °С; |
| – массовая скорость теплоносителя | 500-5500 кг/(м ² ·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°С представлено на рис. 4.

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 ≈10% от среднего подогрева в сборке.

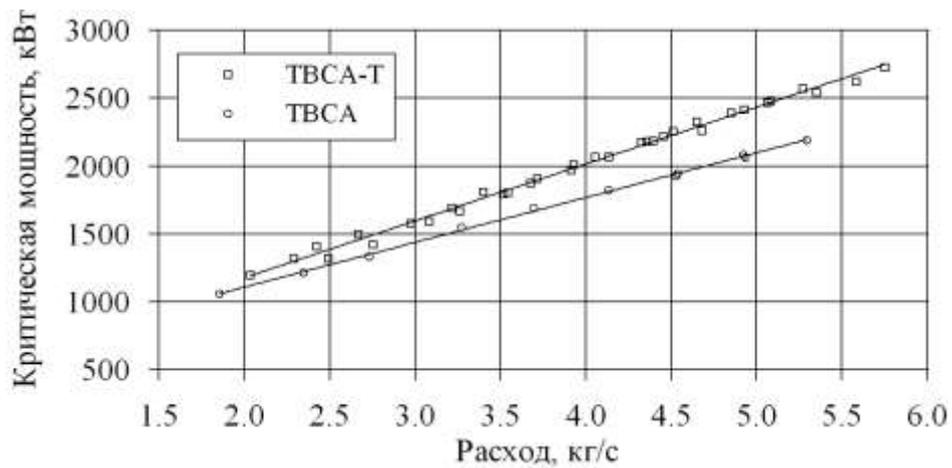


Рис. 4. Зависимость критической мощности от расхода теплоносителя

Сопоставление температуры теплоносителя в ячейках на выходе 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, 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.

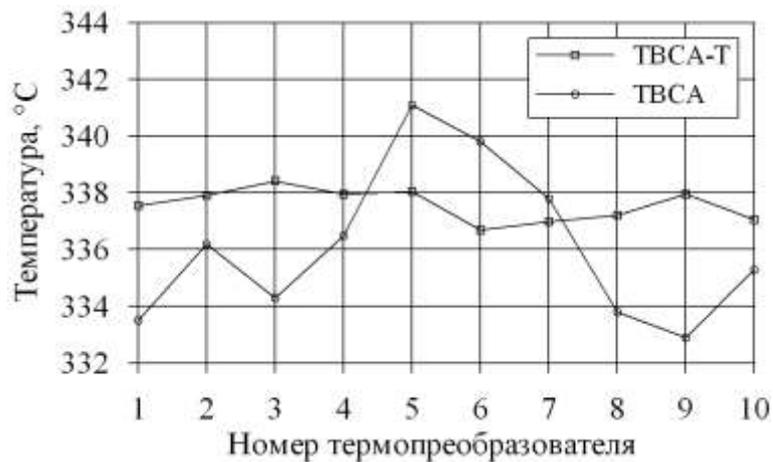


Рис. 5. Распределение температуры теплоносителя в ячейках экспериментальной модели

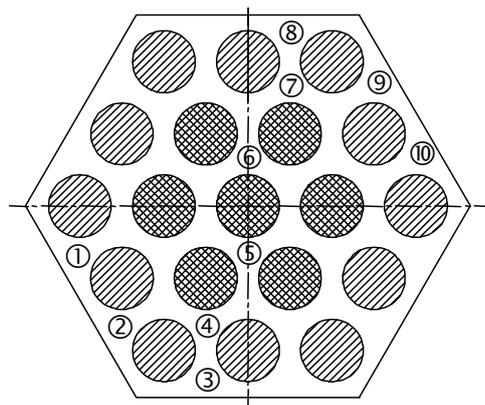


Рис. 6. Схема расположения термопреобразователей в ячейках экспериментальной модели

Разработка и обоснование корреляции для критического теплового потока и уточнение коэффициента межъячейкового обмена

В настоящее время в отечественной практике отсутствуют корреляции для расчета критического теплового потока в ТВС с перемешивающими решетками-интенсификаторами. Наличие увеличенного шага расположения ДР и использование ПР в ТВСА-Т, учитывая полученные результаты исследований, потребовало разработки новой корреляции КТП, а также уточнения коэффициента межъячейкового обмена.

Область применения корреляции КТП выбрана на основе 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 2, 3 и 4 петлях:

| | |
|---|-----------------------------------|
| – давление теплоносителя | 13,0÷17,0 МПа; |
| – массовая скорость теплоносителя | 1000÷4000 кг/(м ² ·с); |
| – относительная энтальпия теплоносителя | –0,1÷+0,3. |

Разработка и обоснование корреляции КТП включало 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 ячейкового кода «КАНАЛ».

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

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 критического теплового потока (корреляция CRT-1):

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

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 CRT-1 имеет вид

$$F_F = \left[\frac{C}{q_z \cdot [1 - \exp(-C \cdot l_z)]} \int_0^{l_z} q(z) \cdot \exp(-C \cdot (l_z - z)) dz \right]^{-1}, \quad (2)$$

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 определены из условия минимального значения среднеквадратичного отклонения расчетных и экспериментальных значений КТП.

Общее количество полученных экспериментальных точек, входящих в область применения корреляции CRT-1, составляет ≈ 900 (в том числе ≈ 50 экспериментальных точек в области отрицательных паросодержаний).

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

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

Погрешность расчета КТП по корреляции CRT-1 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 $n \approx 900$).

Сопоставление КТП, рассчитанных по корреляции CRT-1 и корреляции Ю.А. Безрукова [5] при давлении 15,7 МПа и относительной массовой скорости 4000 кг/(м²·с), представлено на рис. 7.

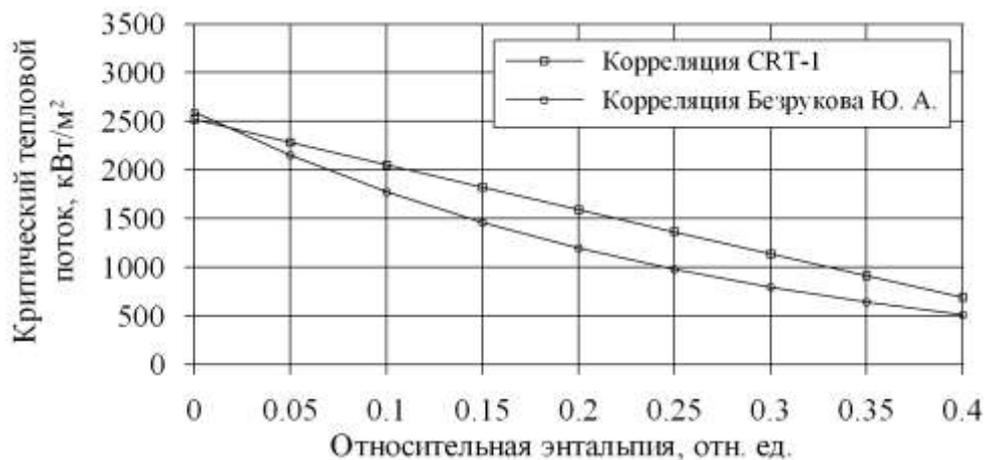


Рис. 7. Зависимость критического теплового потока от относительной энтальпии теплоносителя

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 [6]:

$$K_{\text{ТО}}^{\text{СТ}} = \frac{0,03}{d_{\text{ТВ}} \cdot \text{Re}_{\text{ТВС}}^{1/12}}, \quad (3)$$

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

$$TDC = \frac{w'}{w} = K_{\text{ТО}} \cdot \frac{f}{\delta}, \quad (4)$$

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 основе анализа результатов исследований эффективности перемешивания на крупномасштабных моделях ТВСА 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 (3).

Эффективный коэффициент межъячейкового обмена определялся исходя из 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 $K_{\text{эфф}}$ рассчитывалась суммарная величина квадратов отклонения расчетных и экспериментальных значений температуры в ячейках для всей серии экспериментальных режимов:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{\frac{1}{N_P - 1} \cdot \frac{1}{N_{\text{ТП}} - 1} \cdot \sum_{j=1}^{N_P} \sum_{i=1}^{N_{\text{ТП}}} \left(\frac{t_i^{\text{расч}} - t_i^{\text{эксп}}}{\overline{\Delta t}} \right)_j^2}, \quad (5)$$

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

Графическая зависимость $S_{\Sigma} = f(K_{\text{эфф}})$ представлена на рис. 8.

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 (3).

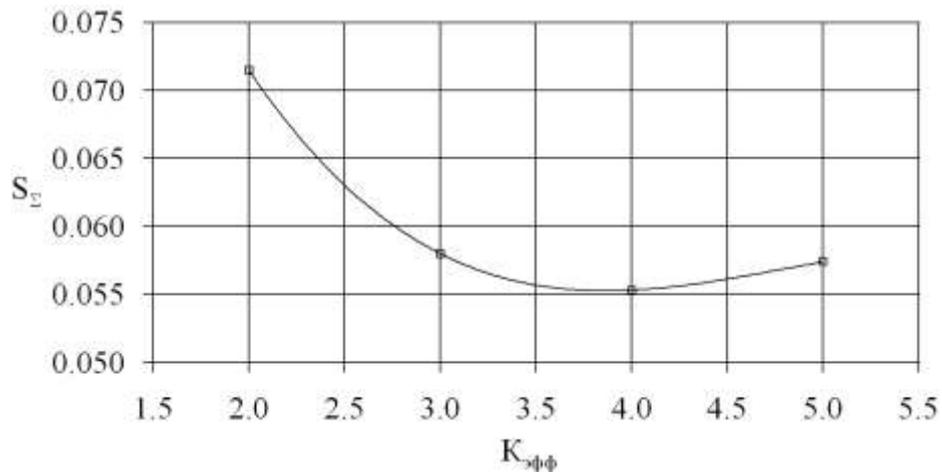


Рис. 8. Зависимость суммарной величины квадратов отклонений от эффективного коэффициента обмена

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.

Учитывая полученную по результатам статистического анализа погрешность 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 3,0 раза большим, по сравнению со значением для пучков твэлов с ДР без смесительных элементов (коэффициент тепловой диффузии $TDC=0,036$).

Анализ эффективности применения перемешивающих решеток в ТВСА-Т в реакторах ВВЭР-1000

Конструкция ТВСА-Т с перемешивающими решетками была разработана с целью увеличения эффективности топливоиспользования, повышения показателей надежности, экономичности и технологичности при эксплуатации активных зон реакторов ВВЭР-1000.

Применение перемешивающих устройств позволяет обосновать эксплуатацию тепловыделяющих сборок с увеличенной ураноемкостью и улучшенными теплогидравлическими характеристиками при повышении мощности тепловыделения активных зон и увеличении предельной тепловой нагрузки на твэл.

В обоснование активных зон ВВЭР-1000 с ТВСА-Т, учитывая результаты экспериментальных исследований гидродинамики потока теплоносителя и кризиса теплоотдачи, проведен анализ условий охлаждения тепловыделяющих элементов в условиях эксплуатации топливных циклов с уменьшенной утечкой нейтронов.

Анализ теплотехнических характеристик активной зоны с ТВСА-Т выполнен с использованием расчетного кода «КАНАЛ». Расчетная область содержала все ячейки ТВСА-Т, включая уголки и межкассетные зазоры. Фрагмент схемы разбиения ТВСА-Т на расчетные ячейки приведен на рис. 9.

Основным критерием теплотехнической надежности активных зон реакторов ВВЭР в режимах нормальной эксплуатации и нарушения нормальной эксплуатации является предотвращение кризиса теплоотдачи на поверхности наиболее «горячего» твэла с вероятностью не менее 95% при доверительном уровне 95%.

Расчет коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи проводился для предельных энерговыделений твэлов с учетом отклонений параметров и неопределенностей. Значение максимально допустимой линейной нагрузки на твэл составляло 448 Вт/см на высоте 50%

активной части твэла и 375 Вт/см на высоте 80% активной части твэла при максимально допустимой относительной мощности твэлов $Kr = 1,63$.

Данные значения линейных нагрузок и мощности твэлов соответствуют характерным значениям показателей неравномерности энергораспределения топливных загрузок перспективных топливных циклов (5·12 мес., 3·18 мес.).

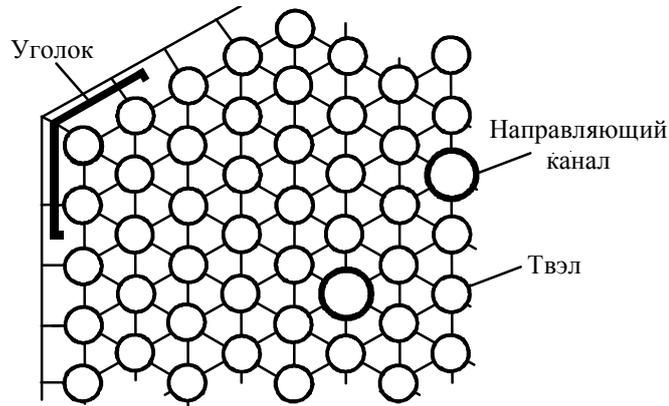


Рис. 9. Фрагмент схемы разбиения ТВСА-Т на расчетные ячейки

При расчете условий охлаждения твэлов в ТВСА-Т принималась во внимание неоднородность в размещении дефлекторов по сечению ПР: их отсутствие в ячейках вблизи НК, что приводит к перераспределению расходов таким образом, что условия охлаждения твэлов вблизи НК улучшаются, по сравнению со стандартными ячейками.

Таким образом, в отличие от ТВСА без перемешивающих устройств, где определяющими являются ячейки вблизи НК, для ТВСА-Т определяющими по запасу до кризиса теплоотдачи становятся стандартные ячейки.

Результаты расчета минимального коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи для активной зоны с ТВСА-Т применительно к характерным параметрам РУ ВВЭР-1000 с учетом отклонений параметров и неопределенностей представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики активной зоны ВВЭР-1000 с ТВСА-Т

| Характеристика | Значение |
|--|----------|
| Тепловая мощность, МВт | 3150 |
| Температура теплоносителя на входе в активную зону, °С | 293,8 |
| Давление, МПа | 15,34 |
| Средняя линейная нагрузка, Вт/см | 156,3 |
| Максимальная относительная мощность твэлов | 1,63 |
| Максимальная относительная мощность ТВСА-Т | 1,45 |
| Коэффициент гидравлического сопротивления ТВСА-Т | 15,2 |
| Минимальный коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи | 1,5 |

Минимальное значение коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи в стандартной ячейке реализуется для аксиального поля энерговыделения косинусоидального типа на высоте 65-80% от полной высоты активной части твэлов и составляет 1,5. Эта величина обосновывает надежное охлаждение твэлов при эксплуатации топливных загрузок с ТВСА-Т в режимах нормальной эксплуатации.

Сравнительный расчет эффективности применения перемешивающих решеток в составе ТВСА проведен на примере пределов активной зоны Core Thermal Limits – граничных значений параметров теплоносителя для защиты активной зоны от возникновения кризиса

теплоотдачи, устанавливающих максимально допустимые значения температуры на входе в активную зону в зависимости от уровня мощности тепловыделения активной зоны.

На рис. 10 для параметров РУ ВВЭР-1000 приведены две зависимости пределов активной зоны Core Thermal Limits: для ТВСА-Т с перемешивающими решетками и для ТВСА без перемешивающих решеток, рассчитанные в одинаковых условиях эксплуатации активной зоны. Линия T_s является ограничивающей по условию отсутствия объемного кипения теплоносителя в среднем по сечению активной зоны.

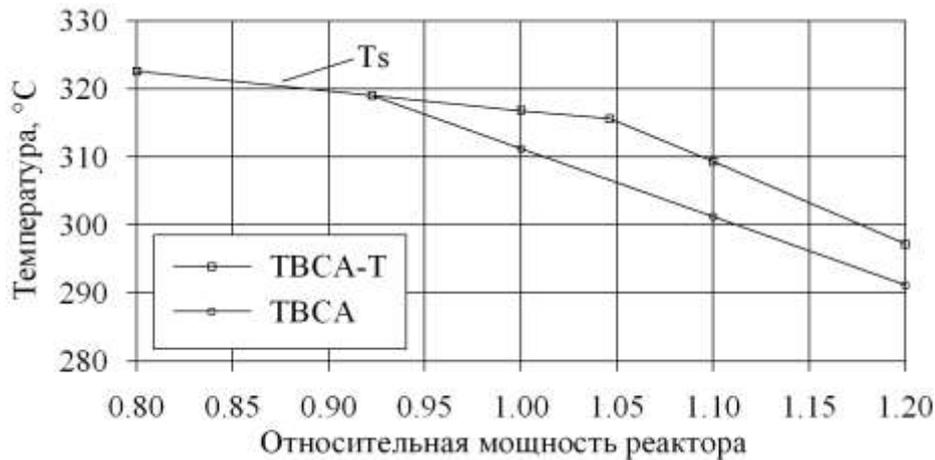


Рис. 10. Пределы активной зоны Core Thermal Limits

Как видно из рис. 10, для активной зоны из ТВСА-Т с перемешивающими решетками в оперативном диапазоне эксплуатационных параметров РУ ВВЭР-1000 выигрыш по мощности, по сравнению с активной зоной из ТВСА без перемешивающих решеток, составляет $\approx 8\%$. Это позволит обосновать безопасность эксплуатации активных зон с ТВСА-Т на повышенных уровнях мощности, в том числе и для перспективных реакторов ВВЭР-1200 (проектное значение тепловой мощности РУ ВВЭР-1200 составляет 107% от тепловой мощности РУ ВВЭР-1000).

Следует отметить, что применение перемешивающих решеток в ТВСА-Т также способствует улучшению условий охлаждения твэлов, по сравнению с ТВСА без перемешивающих решеток. Например, для натурных параметров РУ ВВЭР-1000 при использовании перемешивающих решеток доля поверхности твэлов с поверхностным кипением теплоносителя в напряженной ТВС сокращается на 10%. Уменьшение площади кипения теплоносителя на поверхности твэлов приводит к снижению толщины оксидной пленки на оболочке твэлов и имеет большое значение с точки зрения увеличения ресурса работоспособности топлива при достижении высоких значений выгорания.

Выводы

Выполнен комплекс экспериментальных исследований для определения эффективности использования перемешивающих решеток-интенсификаторов теплообмена и обоснования характеристик тепловыделяющей сборки ТВСА-Т. 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.

Применение перемешивающих решеток в составе тепловыделяющей сборки ТВСА-Т решает задачу обоснования эксплуатации загрузок с увеличенной ураноемкостью в перспективных топливных циклах с уменьшенной утечкой нейтронов, характеризующихся увеличением предельной тепловой нагрузки на твэл.

Повышенные теплотехнические запасы активных зон из ТВСА-Т с решетками-интенсификаторами теплообмена позволяют увеличить допустимое энерговыделение твэлов и дают возможность эксплуатации активных зон на повышенных уровнях мощности с сохранением неравномерности энергораспределения.

Выполненные экспериментальные исследования и результаты теплогидравлических расчетов подтверждают надежное охлаждение твэлов в ТВСА-Т в условиях повышенных значений показателей неравномерности энергораспределения в активной зоне ВВЭР-1000.

Библиографический список

1. **Самойлов, О.Б.** Теплогидравлические и гидродинамические исследования характеристик ТВС альтернативной конструкции ВВЭР-1000 / О.Б. Самойлов [и др.] // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2004. Вып. 2. С. 47–55.
2. **Фальков, А.А.** Расчетные и экспериментальные исследования теплогидравлических характеристик ТВСА ВВЭР-1000 / А.А. Фальков [и др.] // WWER fuel performance, modeling and experimental support: сб. докладов 6-й международной конференции. Albena, Bulgaria. 2005.
3. **Самойлов, О.Б.** Технические характеристики и результаты эксплуатации ТВСА ВВЭР-1000 / О.Б. Самойлов [и др.] // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: сб. трудов 5-й Международной научно-технической конференции. Подольск. 2007.
4. **Самойлов, О.Б.** Расчетно-экспериментальные исследования в обоснование перемешивающих решеток-интенсификаторов для ТВСА ВВЭР-1000 / О.Б. Самойлов [и др.] // Теплофизика 2008: сб. тезисов докладов. Обнинск. 2008.
5. **Безруков, Ю.А.** Экспериментальные исследования и статистический анализ данных по кризису теплообмена в пучках стержней для реакторов ВВЭР / Ю.А. Безруков, В.И. Астахов, В.Г. Брантов // Теплоэнергетика. 1976. № 2. С. 80–82.
6. **Полянин, Л.Н.** Тепло- и массообмен в пучках стержней при продольном обтекании турбулентным потоком жидкости // Атомная энергия. 1969. Т. 26. Вып. 3.

*Дата поступления
в редакцию 02.11.2010*

S.M. Dmitriev, O.B. Samoylov, V.E. Lukyanov, O.N. Morozkin

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF USING OF THE MIXING SPACER GRIDS IN ALTERNATIVE DESIGN FUEL ASSEMBLIES IN REACTORS VVER-1000

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 high efficiency of the using the combined spacer grids in TVSA-T in reactor VVER-1000 is shown.

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