

e-mail: dep48_teplofiz@okbm.nnov.ru

Р и с. 1. Расчетная схема ТВС: HO и HV — входной и выходной участки ТВС соответственно; HOV и HZV — входной и выходной участки кольцевых щелей соответственно; HH — активная часть ТВС; j, i — номер кольцевой щели и кольца соответственно; r_{ij} — радиус кольца i со стороны щели j ; δ_{ij} — толщина оболочки кольца i со стороны щели j ; V, U — общее количество кольцевых щелей и колец соответственно

Для определения температурного состояния твэла и распределения теплового потока с его поверхности используют аналитическое решение системы дифференциальных уравнений в элементарном секторе ТВС в частных производных. Обогреваемый участок ТВС разбивают по высоте на равные участки и принимают допущение, что перенос тепла между полученными слоями твэлов отсутствует, а связь между решениями для соседних по высоте участков осуществляется только через теплоноситель. Для решения уравнения теплопроводности в кольцах в качестве граничных условий на каждом высотном участке используют параметры теплоносителя в кольцевых щелях — температуру и коэффициенты теплоотдачи. Решение уравнений для определения гидравлических и тепловых характеристик происходит итерационным методом — до достижения заданной точности расчета.

Особенности формирования матрицы верификации. Верификацию проводили применительно к активным зонам исследовательских реакторов и реакторов-наработчиков изотопов. Для этих реакторов определяющими теплотехническими критериями являются установленная в проекте твэла максимально допустимая температура оболочки и недопустимость поверхностного кипения теплоносителя. Следовательно, основным верифицируемым параметром была температура оболочки твэла в условии конвективного теплообмена при турбулентном режиме течения теплоносителя.

Особенностью верификации программного средства для расчета теплогидравлических параметров активных зон с кольцевыми твэлами заключается в том, что в них реализуется сложная схема взаимного влияния параметров друг на друга, которая заключается в возможности перераспределения тепловых потоков с внешней и внутренней поверхности твэлов в соответствии с температурой теплоносителя и условиями теплообмена с каждой стороны. Учитывая это, для подтверждения корректности расчета температуры оболочки твэлов провели верификационные расчеты, в которых

проверяли отдельные параметры при фиксированных других, в частности:

перепады давления теплоносителя на кольцевых каналах (распределение расхода теплоносителя по кольцевым зазорам);

коэффициенты теплоотдачи;

подогрев (температуры) теплоносителя в щелях;

распределение тепловых потоков с поверхности колец (твэлов) при известных граничных условиях — температуре теплоносителя и коэффициентами теплоотдачи.

Общий объем данных, используемых для верификации, составил более 20 тыс. точек. В качестве данных для верификации использовали результаты:

экспериментальных исследований на гидравлических стендах СТ-1950 и БМ 1117: проводили валидацию по гидравлическому сопротивлению кольцевых зазоров (распределению расхода теплоносителя по кольцевым зазорам), а также отдельных участков ТВС штатных конструкций;

экспериментальных исследований на теплофизическом стенде Л-186 моделей отдельных кольцевых зазоров: использовали несколько моделей, которые представляли собой кольцевой канал, образованный двумя соосными трубами с установленными на них термоэлектрическими преобразователями; одна или обе трубы обогревались за счет пропускания через них электрического тока (рис. 2);

расчетов по верифицированной программе-аналогу СТАРТ;

расчетов по аналитическим зависимостям и расчетов по аттестованному программному средству ANSYS Mechanical в части решения задачи теплопроводности в трехслойной стенке с внутренним источником энерговыделения с заданными граничными условиями третьего рода;

эксплуатации каналов реактора с термометрическими твэлами кольцевого типа: обобщены данные эксплуатации, в качестве условий работы ТВС для верификации использовали следующие режимные параметры:

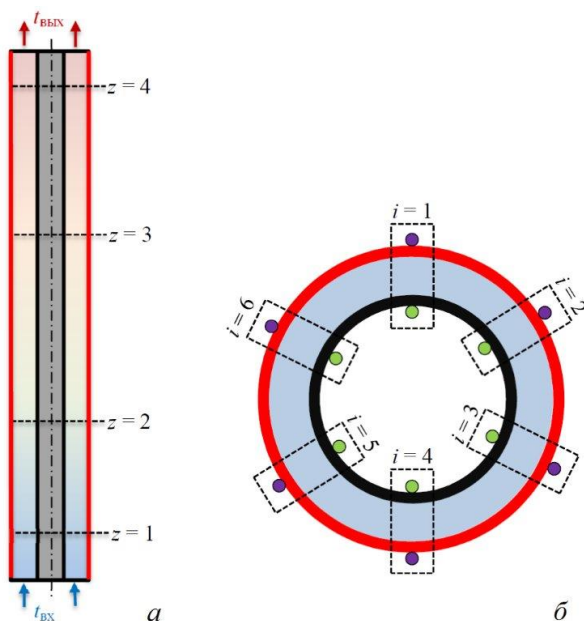
температуру теплоносителя на входе в канал (в реактор);

аксиальные поля энерговыделения, расчетные или восстановленные по показаниям рядом стоящего канала контроля;

температуру теплоносителя на выходе из канала;

расход теплоносителя через канал, определенный с использованием его экспериментальной гидродинамической характеристики;

мощность канала, рассчитанную по уравнению теплового баланса канала.



Р и с. 2. Продольное (а) и поперечное сечение (б) экспериментальной модели кольцевого зазора с внешней обогреваемой трубой: z — номера высотных сечений измерений; i — номера попарно расположенных термоэлектрических преобразователей в каждом высотном сечении; $t_{\text{вх}}, t_{\text{вых}}$ — температура теплоносителя на входе в модель и на выходе из нее соответственно

Результаты верификационных расчетов. По итогам верификации по гидравлическому сопротивлению получено, что максимальное отклонение его расчетных и экспериментальных значений для кольцевых зазоров и отдельных участков канала не превышает $\pm 15\%$. Верификация по тепловому потоку и температуре

теплоносителя показала, что отклонение расчета от эксперимента (аналитического теста и расчета по программному средству ANSYS Mechanical) близко к нулю, в связи с чем его влиянием на неопределенность расчета температуры оболочки можно пренебречь.

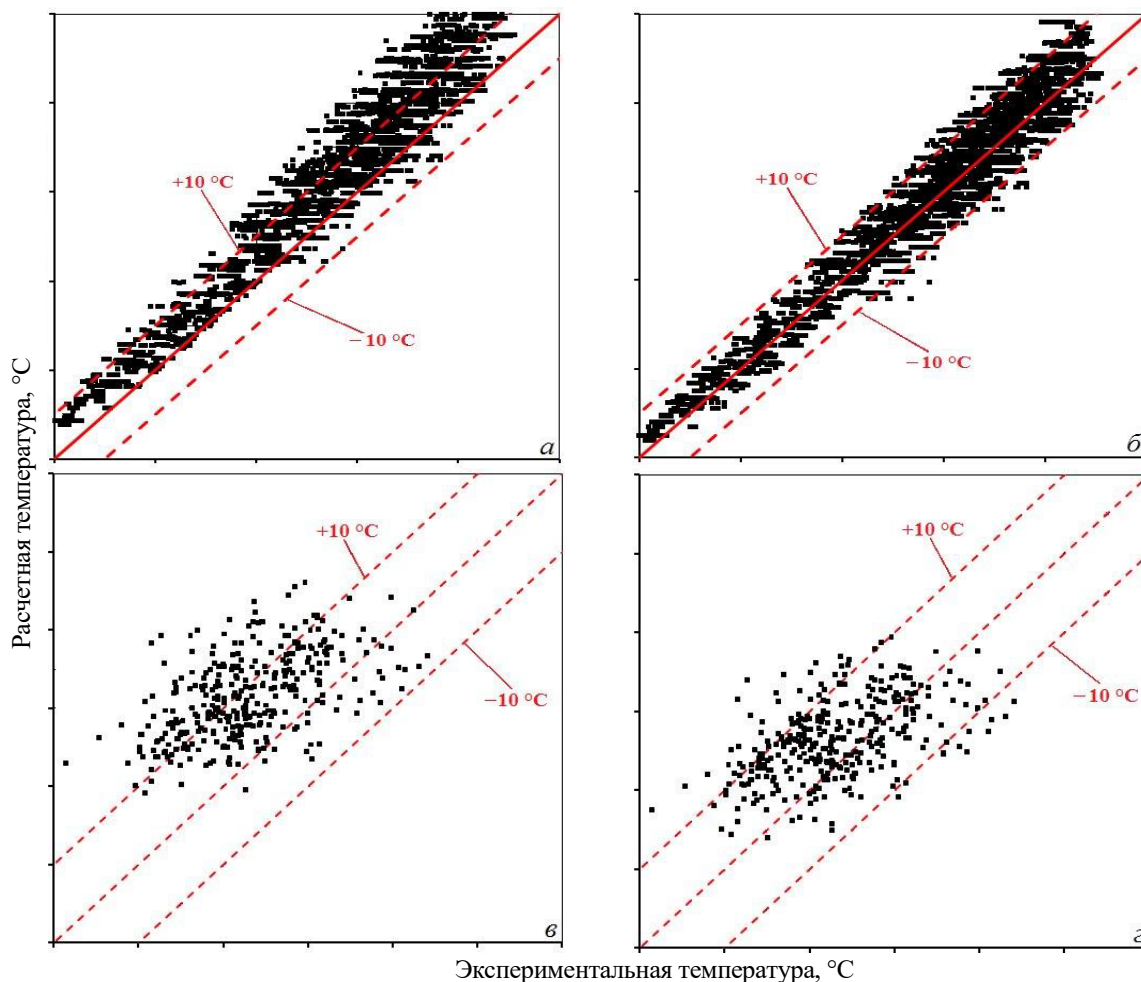
Основным параметром, оказывающим влияние на точность расчета температуры оболочки твэлов, является коэффициент теплоотдачи. В программе RING 2.0 заложена корреляция классического вида [3]

$$Nu = Ka Re^{0,8} Pr^{0,4} K_{\mu} K_d,$$

где Ka — константа корреляции; Re — число Рейнольдса; Pr — число Прандтля; K_{μ} — коэффициент учета отношения вязкости теплоносителя в ядре потока и у стенки; K_d — коэффициент учета отношения диаметров кольцевого канала.

Влияние точности расчета коэффициента теплоотдачи в проведенной верификации проверяли на теплофизическом стенде Л-186, а также на термометрических каналах (рис. 3). По результатам верификационных расчетов, проведенных для двух коэффициентов Ka , получено, что при Ka , равном 0,018 (значение по умолчанию), среднеарифметическое отклонение расчетной от экспериментальной температуры оболочки составляет $+9,5^\circ\text{C}$, среднеквадратичное отклонение — $4,8^\circ\text{C}$, при Ka , равном 0,021, эти показатели составляют $+2,8$ и $4,9^\circ\text{C}$ соответственно. Первое значение коэффициента Ka позволяет получить завышенные (консервативные) значения температуры оболочки, второе — близкие к экспериментальным.

Отклонения расчетных значений температуры оболочки от экспериментальных, полученные по результатам верификации на экспериментальных моделях теплофизического стенда Л-186 и термометрических каналов реактора, коррелируют между собой, что доказывает корректность принятых подходов.



Р и с. 3. Результаты верификации по температуре обогреваемой поверхности на теплофизическом стенде Л-186 (а, б) и по температуре оболочки на термометрических каналах (в, г) при $K\alpha$, равном 0,018 (а, в) и 0,021 (б, г)

Заключение. На основании результатов проведенного комплекса работ и экспериментальных исследований выполнена верификация разработанного программного средства RING 2.0 применительно к теплогидравлическим расчетам ТВС исследовательских реакторов и реакторов, нарабатывающих изотопы, с кольцевыми ТВЭлами. По результатам верификации выработаны настройки корреляции для расчета коэффициента теплоотдачи, позволяющие получать наиболее реалистичные значения главного теплотехнического критерия — температуры оболочки ТВЭлов. Программное средство планируется использовать при проектировании и сопровождении эксплуатации соответствующих типов активных зон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савиновский А.С., Носков А.С., Матяш П.Б. Результаты доработки и тестирования теплогидравлического кода RING для расчета активных зон с коаксиальными кольцевыми ТВЭлами. — Сб. докладов научно-технической конференции «Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика-2016)», г. Обнинск, 12—14 октября 2016 г. Обнинск: ГНЦ РФ — ФЭИ, 2017, 596 с. — Доступно на сайте АО «ГНЦ РФ — ФЭИ». Режим доступа: в свободном доступе. URL: <https://www.ippe.ru/images/publications/thesis/tf-2016-tezis.pdf> (дата обращения 05.12.2023).
2. Старков В.А., Марихин Н.Ю. Методика и программа расчета стационарного температурного поля в системе многозонных цилиндрических ТВЭлов. — Известия вузов. Ядерная энергетика, 2013, № 1, с. 54—62.
3. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Уч. для вузов. Изд. 4-е, доп. и перераб. М: Энергоиздат, 1981, 415 с.

Поступила в Редакцию 14.12.23