

О НЕОБХОДИМОЙ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ РАСЧЕТЕ РЕАКТОРОВ ТИПА БН

Ю.С. Юрьев, И.Т. Афанасьева

ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского, г. Обнинск



Получены выражения для расчета отклонений температуры твэлов БН вследствие неопределенности свойств теплоносителя. С помощью дисперсионной методики проведена сравнительная оценка вклада разных составляющих отклонений. Сделан вывод о важности геометрических допусков твэлов, отклонений мощности реактора, теплоемкости и плотности теплоносителя.

ВВЕДЕНИЕ

На разной стадии проектов ЯЭУ с ЖМТ при теплогидравлических расчетах используются значения свойств ЖМ. Эти свойства определяются экспериментальным путем с применением расчетных методов химической термодинамики и физической химии. Они представляются в виде таблиц, графиков и формул и размещаются также в соответствующих блоках расчетных кодов [1, 2]. Вопрос о точности этих исходных данных часто не стоит, поскольку опыт расчетов и проектирования реакторов с ЖМТ показывает ее практическую достаточность.

Однако для объектов новой техники целесообразно представить расчетную оценку необходимой точности этих данных. Понятие необходимой точности связано с влиянием отклонений исходных данных на конечный проектный результат: максимальную температуру стенки твэла, запас до кризиса теплоотдачи и пр. Если выявляется сильное влияние «случайных» отклонений параметров на проектные характеристики, то определяются пределы (допуски) этих параметров и оценивается необходимая точность определения проектных параметров [3, 4]. За пределами необходимой точности конструктор реактора может получить расчетный перегрев твэлов, наступление кризиса теплоотдачи и прочие нежелательные события.

К теплофизическим параметрам ЖМТ относятся

- плотность ρ , кг/м³;
- теплопроводность λ , Вт/м К;
- теплоемкость C_p , Дж/кг К;
- вязкость ν , м²/с.

Ясно, что они действуют в поле других параметров:

- мощности реактора N , Вт;
- конструктивного гидравлического диаметра канала активной зоны d_r , м.

В первом приближении желательно, чтобы отклонения (неопределенности) $\delta\rho$, $\delta\lambda$, δC_p , δv были таковы, чтобы их влияние не превышало влияния отклонений δN и δd_r , которые известны из опыта физического расчета и конструктивных проработок.

Конструкция твэлов, ТВС и реакторов с ЖМТ представлена в [3, 5].

Различия скоростей в разных каналах ТВС

Из условия параллельного включения каналов ТВС $\Delta p_1 = \Delta p_2$ следует, что

$$\xi_1 \frac{L}{d_{r1}} \rho \frac{w_1^2}{2} = \xi_2 \frac{L}{d_{r2}} \rho \frac{w_2^2}{2},$$

откуда

$$\frac{\delta w}{w} = \frac{1}{2} \left(-\frac{\delta \xi}{\xi} + \frac{\delta d_r}{d_r} - \frac{\delta \rho}{\rho} \right).$$

Принимая закон трения в форме [3]

$$\xi = 0,316 \left(\frac{v}{w d_r} \right)^n,$$

получим

$$\frac{\delta w}{w} = - \left(\frac{n}{2-n} \right) \frac{\delta v}{v} + \frac{(1+n)}{(2-n)} \frac{\delta d_r}{d_r} - \frac{1}{(2-n)} \frac{\delta \rho}{\rho}. \quad (1)$$

Таким образом, из решения гидравлической задачи следует, что отклонение скорости теплоносителя в каналах ТВС прямо пропорционально отклонению гидравлического диаметра и обратно пропорционально отклонениям вязкости и плотности теплоносителя.

Подогрев теплоносителя

Из уравнения баланса тепла $T_f - T_{f0} = N / GC_p$, где $G = w\rho F$ – расход, кг/с, следует

$$\frac{\delta(T_f - T_{f0})}{(T_f - T_{f0})} = \frac{\delta N}{N} - \frac{\delta \rho}{\rho} - \frac{\delta w}{w} - \frac{\delta F}{F} - \frac{\delta C_p}{C_p}. \quad (2)$$

Перепад температуры «стенка – жидкость»

$$\frac{\delta(T_w - T_f)}{(T_w - T_f)} = \frac{\delta N}{N} - \frac{\delta \alpha}{\alpha},$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²К, который определяется из критериального выражения $Nu = A Re^m$, где $Nu = \alpha d_r / \lambda$ – число Нуссельта, $Re = w d_r / \nu = w d_r \rho C_p / \lambda$ – число Пекле.

Выполняя стандартные преобразования, получим

$$\frac{\delta(T_w - T_f)}{(T_w - T_f)} = \frac{\delta N}{N} - (1-m) K_\phi \frac{\delta \lambda}{\lambda} + (1-m) \frac{\delta d_r}{d_r} - m \frac{\delta w}{w} - m \frac{\delta \rho}{\rho} - m \frac{\delta C_p}{C_p}, \quad (3)$$

где K_ϕ – коэффициент, учитывающий дополнительный перегрев стенки твэла за счет окружающей неравномерности температуры оболочки.

Исходная формула

Получается комбинацией формул (1), (2), (3) и выражает зависимость отклонений температуры стенки твэла от отклонений всех перечисленных выше параметров:

$$\frac{\delta(T_w - T_{f0})}{(T_w - T_{f0})} = \frac{\delta N}{N} - A_\lambda \left(\frac{\delta \lambda}{\lambda} \right) - A_c \left(\frac{\delta c_p}{c_p} \right) + A_v \left(\frac{\delta v}{v} \right) - A_p \left(\frac{\delta \rho}{\rho} \right) - A_{d\Gamma} \left(\frac{\delta d_\Gamma}{d_\Gamma} \right), \quad (4)$$

где функции влияния

$$\begin{aligned} A_\lambda &= (1-m)K_\phi (\Delta T_\alpha / \Delta T_w), \\ A_c &= m(\Delta T_\alpha / \Delta T_w) + (\Delta T_f / \Delta T_w), \\ A_v &= n / (2-n) (m\Delta T_\alpha / \Delta T_w + \Delta T_f / \Delta T_w), \\ A_p &= (1-n) / (2-n) (m\Delta T_\alpha / \Delta T_w + \Delta T_f / \Delta T_w), \\ A_{d\Gamma} &= [(1+n) / (2-n)] (m\Delta T_\alpha / \Delta T_w + \Delta T_f / \Delta T_w) + \Delta T_f / \Delta T_w - (1-m)\Delta T_\alpha / \Delta T_w, \end{aligned}$$

где ΔT_f – номинальное значение подогрева теплоносителя в ТВС, °С; ΔT_α – номинальный температурный напор «стенка-жидкость», °С (для реакторов БН – в выходном сечении ТВС); $\Delta T_w = (\Delta T_\alpha + \Delta T_f)$.

Функции влияния содержат отношения $(\Delta T_\alpha / \Delta T_w)$, $(\Delta T_f / \Delta T_w)$, которые характеризуют особенности ТВС и далее считаются постоянными.

Применение дисперсионной методики

Будем считать, что величины δN , $\delta \rho$, $\delta \lambda$, δc_p , δv , δd_Γ – независимые и случайные. Тогда по теореме суммы дисперсий получим

$$\sigma_{Tw}^2 = \sigma_N^2 + A_\lambda^2 \sigma_\lambda^2 + A_c^2 \sigma_c^2 + A_v^2 \sigma_v^2 + A_p^2 \sigma_p^2 + A_{d\Gamma}^2 \sigma_{d\Gamma}^2, \quad (5)$$

где σ_i – среднеквадратичное отклонение i -той величины.

Для дальнейшего анализа будем полагать, что вклад всех шести случайных величин в конечный результат равноценен:

$$\begin{aligned} \sigma_N^2 &= A_\lambda^2 \sigma_\lambda^2 = A_c^2 \sigma_c^2 = \dots \\ \sigma_N &= A_\lambda \sigma_\lambda = A_c \sigma_c = \dots \end{aligned}$$

Среднеквадратичное отклонение мощности ТВС будем считать известным и отнесем именно к нему все остальные:

$$\frac{\sigma_\lambda}{\sigma_N} = \frac{1}{A_\lambda}; \quad \frac{\sigma_c}{\sigma_N} = \frac{1}{A_c}; \quad \frac{\sigma_v}{\sigma_N} = \frac{1}{A_v}; \quad \frac{\sigma_p}{\sigma_N} = \frac{1}{A_p}; \quad \frac{\sigma_{d\Gamma}}{\sigma_N} = \frac{1}{A_{d\Gamma}}. \quad (6)$$

Если эти равенства выполняются, то вклад отклонений всех этих величин на результат (T_w) будет одинаков.

Сравнивая паспортные отклонения свойств с полученными, можно судить о достаточности точности исходных величин для теплогидравлических расчетов реакторов.

Пример

Положим (реактор типа БН): $m = 0,8$; $n = 0,25$; $\Delta T_\alpha = 25^\circ\text{C}$; $\Delta T_f = 250^\circ\text{C}$; $\Delta T_w = 275^\circ\text{C}$; $K_\phi = 1$.

Тогда $A_\lambda = 0,02$; $A_c = 0,98$; $A_v = 0,14$; $A_p = 0,42$; $A_{d\Gamma} = 1,39$.

Откуда получаем ряд:

$$\frac{\sigma_{d\Gamma}}{\sigma_N} = 0,72 \text{ I место по влиянию на температуру твэла: отклонения геометрии}$$

ТВС (d_Γ) должны быть меньше заданного отклонения мощности реактора;

$\frac{\sigma_c}{\sigma_N} \approx 1$ II место по влиянию на температуру твэла, поскольку теплоемкость теплоносителя определяет подогрев, а он в реакторах БН велик;

$\frac{\sigma_p}{\sigma_N} \approx 2,4$ III место по влиянию на температуру твэла (по этой же причине);

$\frac{\sigma_v}{\sigma_N} \approx 7,0$ IV место по влиянию на температуру твэла, поскольку рассматривался турбулентный режим течения ($m = 0,8$);

$\frac{\sigma_\lambda}{\sigma_N} \approx 50$ V место по влиянию на температуру твэла, т.к. величина $(\Delta T_\alpha / \Delta T_f)$ в реакторах БН мала.

Уточненные расчеты могут быть проведены с использованием материалов [5–7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение дисперсионной методики к анализу влияния отклонений различных параметров на перегрев твэлов показало, что для реакторов типа БН особое внимание должно быть уделено контролю допусков на геометрические размеры твэлов и ТВС. Достаточно точными должны быть значения теплоемкости и плотности ЖМТ. Требования к точности коэффициентов вязкости и теплопроводности могут быть менее высокими.

Литература

1. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Справочник. – М.: Атомиздат, 1968.
2. Кириллов П.Л., Терентьева М.И., Денискина Н.Б. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: Учебное пособие. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2005.
3. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). – М.: Энергоатомиздат, 1990.
4. Юрьев Ю.С. Перегрев твэлов вследствие случайных отклонений параметров: Учебное пособие. – Обнинск: ИАТЭ, 1989.
5. Жуков А.В., Сорокин А.П., Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С. и др. Методические указания и рекомендации по теплогидравлическому расчету активных зон быстрых реакторов. РТМ-1604.008-88. – Обнинск: ФЭИ, 1988.
6. Курбатов И.М., Тихомиров Б.Б. Расчет случайных отклонений температур в активной зоне реактора/Препринт ФЭИ-1090. – Обнинск, 1980.
7. Тихомиров Б.Б., Савицкая Л.В. Анализ закона распределения температуры оболочки твэлов быстрых реакторов/Препринт ФЭИ-3097. – Обнинск, 2007.

Поступила в редакцию 9.10.2008