

# К расчету температурного поля на поверхности периферийных твэлов кассеты ядерного реактора с жидкотемпературным охлаждением

ШУЛЫНДИН Б. П.

Для обеспечения надежной работы твэлов ядерных реакторов необходимо, чтобы некоторые теплофизические характеристики твэлов не превышали предельно допустимых значений. Поэтому одной из задач теплогидравлического расчета ядерного реактора является определение распределения температуры на поверхности твэлов. Решение этой задачи особенно важно для сборок быстрых реакторов с жидкотемпературным охлаждением, поскольку для них характерны большие значения теплонапряженности, малые значения относительного шага решетки твэлов  $h$  (т. е. отношения шага решетки к диаметру твэлов  $d$ ), а также существенные различия в охлаждении внутренних и периферийных твэлов.

Точно определить поля температуры на поверхности твэлов в сборке путем решения дифференциальных уравнений гидродинамики и теплообмена при винтовом дистанционировании твэлов невозможно, необходимо использовать приближенные методы.

В теплогидравлических расчетах реакторов с жидкотемпературным охлаждением эффективным оказался принцип приближенного теплового моделирования твэлов [1], дающий возможность распространить экспериментальные результаты, полученные на моделях, на реальные сборки [2], а также рассчитать неравномерность температуры на поверхности твэлов в регулярной решетке. В последнем случае полученные расчетным путем для «плоского» режима течения теплоносителя (аксиальная скорость теплоносителя постоянна в сечении сборки) и для значения критерия Прандтля  $\text{Pr} \rightarrow 0$  результаты [3] используются при описании реального турбулентного режима течения [4].

В настоящей работе предлагается метод расчета распределения температуры на поверхности периферийных твэлов шестиугольной кассеты реактора с жидкотемпературным охлаждением, предполагающий разбиение окружающего пространства на пять элементарных ячеек с известными для каждой из них в ряде поперечных сечений сборки значениями средних температур и скоростей теплоносителя. Метод основан на применении к каждой ячейке обобщенного принципа приближенного теплового моделирования.

В работе [3] приведены nomogramмы для расчета (при «плоском» режиме течения) относительной неравномерности температуры по периметру твэла  $\theta(h, \varepsilon_{k_0})$  и коэффициента  $Z(h, \varepsilon_{k_0})$ , учитывающего отличие распределения температуры по периметру от косинусоидального. Они получены отдельно для треугольной и квадратной решеток. Здесь  $\varepsilon_{k_0}$  — параметр теплового подобия, рассчитанный по  $k_0$ -му номеру основной гармоники разложения температурного поля в ряд Фурье [1, 3]. Использование принципа приближенного теплового моделирования основано на возможности обобщения охарактеризованных nomogramм в форме  $\theta(y, \varepsilon_{k_0})$ ,  $Z(y, \varepsilon_{k_0})$ , не зависящей от типа решетки.

Геометрический параметр неравномерности ячейки  $y$  представляет собой отношение среднего расстояния от поверхности твэла до ближайшей линии адиабатиче-

ской границы (ЛАГ) в ячейке (в регулярных ячейках — линии точек, равноотстоящих от твэлов) к минимальному расстоянию. При такой форме записи периодичность поля температуры по периметру твэла не влияет на  $\theta$  и  $Z$  помимо параметров подобия  $\varepsilon_{k_0}$ .

Полученные обобщенные зависимости с погрешностью, не превышающей  $\pm 3\%$ , аппроксимируются соотношениями

$$\theta = 0,23 \exp \left[ 7,35 \cdot 10^{-2} \frac{y - 5,9}{y - 1,049} \right] - \\ - 0,76 \exp \left[ 0,4 \frac{y - 5,9}{y - 1,049} \right] \lg \varepsilon_{k_0}; \quad (1)$$

$$Z = 1,01 - 0,307 \exp \left[ 0,262 \frac{y - 5,9}{y - 1,049} \right] \lg \varepsilon_{k_0}. \quad (2)$$

Эти соотношения справедливы для  $k_0 = 4$  (квадратная решетка) и  $k_0 = 6$  (треугольная решетка). Можно поэтому полагать, что они справедливы для любой части периметра твэла в нерегулярной ячейке между направлениями из центра твэла на наиболее и наименее удаленные от поверхности твэла точки ЛАГ, т. е. для части периметра между точками относительных минимумов и максимумов температуры на поверхности твэла. Это предположение позволяет определить относительные значения максимумов и минимумов температуры, после чего провести «шивку» распределения температуры путем простого усреднения значений температуры на границах расчетных зон. Следует заметить, что при таких вычислениях под  $k_0$  следует понимать отношение угла  $\pi$  к углу между направлениями из центра твэла на точки относительных максимума и минимума температуры. В результате описанной расчетной процедуры могут быть получены значения температуры поверхности каждого периферийного твэла в 10 точках его периметра.

Определяя  $\theta$  при отсутствии вытеснителей в периферийных ячейках, без особой погрешности можно полагать, что линией адиабатической границы в направлении чехла кассеты является внутренний периметр чехла. Параметр  $y$  следует вычислять для каждой расчетной зоны, в пределах которой расстояние от поверхности твэла до ЛАГ меняется монотонным образом. Например, для бокового твэла шестиугольной кассеты такими расчетными зонами являются площадки ОВС, ОСД, ОДЕ и др. (рис. 1).

Учет присутствия вытеснителей в периферийных ячейках может быть легко проведен исправлением параметра неравномерности  $y$  по следующему приближенному соотношению, учитывающему изменение среднего расстояния от поверхности твэла до ЛАГ:

$$y = y_0 \frac{2 \sqrt{(F - F_B) / \pi} - d}{2 \sqrt{F / \pi} - d}, \quad (3)$$

где  $y_0$  — геометрический параметр неравномерности

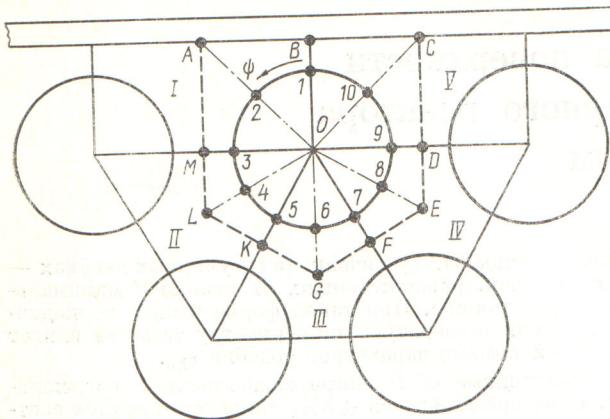


Рис. 1. Схема окрестности бокового твэла шестигранной касеты:

I—V — ячейки; 1—10 — расчетные точки

расчетной зоны без вытеснителя;  $F$  — площадь попечного сечения зоны без вытеснителя;  $F_b$  — площадь зоны, занимаемая вытеснителем.

Учет теплового взаимодействия соседних ячеек следует проводить, используя в соотношениях (1) и (2) некоторый эффективный параметр неравномерности  $y_0$  вместо геометрического  $y$ :

$$y_0 = 1 + (y - 1) \exp \left( -15 \frac{\lambda_{fi} |t_{i+1} - t_{i-1}|}{\Delta \bar{P}_i \bar{q}} \right), \quad (4)$$

где  $t_{i+1}$  и  $t_{i-1}$  — средняя температура теплоносителя в ячейках, соседних с рассматриваемой ячейкой  $i$ ;  $\lambda_{fi}$  — коэффициент теплопроводности теплоносителя в ячейке  $i$ ;  $\Delta \bar{P}_i$  — длина периметра твэла в пределах ячейки  $i$ ;  $\bar{q}$  — средняя тепловая нагрузка поверхности твэла. Соотношение (4) получено из представления о влиянии на неравномерность температуры соотношения перпендикулярных и параллельных периметру твэла потоков тепла.

Правильность формы соотношения (4) подтверждается тем, что при использовании его и численного значения 15 для коэффициента имеет место хорошее согласие расчетных результатов и экспериментальных данных, которые получены на сборках, сильно отличающихся по геометрическим параметрам и условиям охлаждения [2, 5, 6].

Таким образом, разработанный метод расчета полей температуры на поверхности периферийных твэлов сводится к следующему. С использованием одной из существующих методик (например, по методикам работ [6, 7]) в каждом рассматриваемом сечении сборки по высоте в каждой окружающей периферийный твэл ячейке определяются средние значения аксиальной скорости и температуры теплоносителя, температуры поверхности твэла. Определяются геометрические и эффективные параметры неравномерности расчетных зон и значения  $\theta$  и  $Z$  для плоского течения теплоносителя с использованием соотношений (1) — (4). Значение  $\theta$  множится на поправочный коэффициент  $\chi$ , учитывающий отличие турбулентного режима течения жидкости от плоского и вычисляемый по соотношению работы [4], причем для периферийных ячеек вместо относительного шага решетки используется некоторое эффективное значение шага такой треугольной решетки, в элементарных

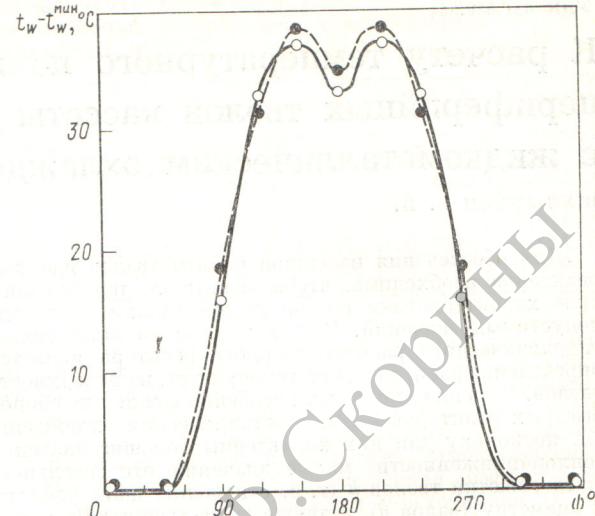


Рис. 2. Распределение температуры по периметру бокового твэла сборки БОР-60 на высоте 0,24 м от входа в активную зону:

● — эксперимент [2]; ○ — расчет

ячейках которой доля теплоносителя такая же, как в рассматриваемой периферийной ячейке.

Для каждой расчетной зоны вычисляются значения температуры поверхности твэла в точках относительных максимумов ( $t_w^{\max}$ ) и минимумов ( $t_w^{\min}$ ):

$$t_w^{\max} = \bar{t}_{wi} + \frac{Z\theta}{Z+1} \frac{d\bar{q}}{2\lambda_{fi}}, \quad (5)$$

$$t_w^{\min} = \bar{t}_{wi} - \frac{\theta}{Z+1} \frac{d\bar{q}}{2\lambda_{fi}}, \quad (6)$$

где  $\bar{t}_{wi}$  — средняя температура поверхности твэла в пределах ячейки. На границах зон значения температуры усредняются.

Разработанная методика применялась для расчета поля температуры на поверхности угловых и боковых твэлов сборок с жидкокометаллическим охлаждением, для которых проводились теплофизические исследования на моделях [2, 5], и показала хорошее совпадение расчетов с экспериментами (рис. 2).

Поступило в Редакцию 22.III.78

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ушаков П. А. В кн.: Жидкие металлы. М., Атомиздат, 1967, с. 137.
2. Субботин В. И. и др. «Атомная энергия», 1970, т. 28, вып. 6, с. 489.
3. Ушаков П. А. и др. Препринт ФЭИ-163. Обнинск, 1969.
4. Ибрагимов М. Х., Жуков А. В. «Атомная энергия», 1968, т. 24, вып. 6, с. 520.
5. Жуков А. В. и др. [1], с. 170.
6. Субботин В. И. и др. Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках (основы расчета). М., Атомиздат, 1975.
7. Минашин В. Е. и др. Теплофизика ядерных реакторов с жидкокометаллическим охлаждением и методы электромоделирования. М., Атомиздат, 1971.