

существовать переходная область, где α_2 меняется от нуля до единицы.

Поступила в Редакцию 20/XI 1965 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сб. «Жидкометаллические теплоносители». Перев. под ред. А. Е. Шейндлина. М., Изд-во иностр. лит., 1958.
 2. Э. Э. Шпильрайн, Э. И. Асиновский. «Инж.-физ. ж.», V, № 4 (1962).

3. F. Metzger, E. Miescher. Helv. phys. acta, 16, 205, 323 (1943).
 4. O. Knacke, I. Stranski. Progr. Metal. Phys., 6, 181 (1956).
 5. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., Физматгиз, 1963, стр. 285.
 6. Р. Я. Кучеров, Л. Э. Рикенглаз. ЖЭТФ, 37, вып. 1 (1959).
 7. Р. Я. Кучеров, Л. Э. Рикенглаз. Докл. АН СССР, 133, № 5 (1960).
 8. В. И. Субботин и др. «Теплофизика высоких температур», 2, № 4 (1964).

Исследование термических деформаций твэлов

Е. Я. САФРОНОВ, Б. А. БРИСКМАН,
 В. Д. БОНДАРЕВ, В. С. ШИШОВ

УДК 621.039.548

Рассчитаны температурные перепады в стенках твэлов кассетного типа в условиях радиального градиента нейтронного потока. Измерены термические деформации стенок в рабочем диапазоне перепадов температур.

уравнение теплопроводности для тонкой пластины (одномерная задача) с внутренними источниками тепла:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{q_v}{\lambda} = 0. \tag{1}$$

Здесь

$$q_v = q_{v1} + q_{v2}; \tag{2}$$

$$q_{v1} = q_{v_{\min}} \left[1 + \frac{x}{L} (n - 1) \right] \tag{3}$$

(градиент тепловыделения примем линейным);

$$q_{v2} = -\alpha \frac{S}{V} (T - t_0), \tag{4}$$

В твэлах ядерных реакторов, расположенных рядом с отражателем, регулирующими или компенсирующими стержнями, возникает радиальный градиент нейтронного потока, вызванный всплеском в отражателе или поглощением нейтронов в стержнях. Одновременно с градиентом нейтронного потока в твэле создается и радиальный градиент тепловыделения, который при одинаковых условиях теплоотдачи по периметру твэла приводит к появлению перепада температур по радиусу твэла, а следовательно, и термических деформаций рубашек твэла [1]. Аналитическое вычисление деформаций при сложной геометрической конфигурации твэлов крайне затруднительно, поэтому экспериментальный метод определения деформаций в таких случаях оказывается практически единственным*.

где n — степень неравномерности тепловыделения; L — длина полупериметра рубашки макета твэла; λ — коэффициент теплопроводности; α — коэффициент теплоотдачи от стенки к воде; $q_{v_{\min}}$ — величина минимального тепловыделения; t_0 — средняя температура охлаждающей воды; $\frac{S}{V}$ — отношение поверхности к объему; T — температура рубашки.

При граничных условиях

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = 0; \tag{5}$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=L} = 0 \tag{6}$$

Для получения более широкого представления о работе твэлов было проведено исследование термических деформаций макета кассетного твэла, имеющего сечение в виде шестигранника.

Аналитическое определение перепадов температур

Расчет ведется для наружной шестигранной рубашки в виде тонкой пластины. Запишем

решением уравнения (1) служит выражение

$$\Delta T = \frac{q(n-1)\delta}{2\alpha} - \frac{q(n-1)\delta}{LaB} \cdot \frac{e^{BL} - 1}{e^{BL} + 1}, \tag{7}$$

где δ — толщина стенки.

$$\text{Здесь } B^2 = 2 \frac{\alpha}{\lambda \delta}.$$

* В распоряжении авторов настоящей работы имелись некоторые результаты экспериментального определения деформаций макета твэла, полученные в филиале Ленинградского физико-технического института им. А. И. Иоффе.

В исследуемом интервале значений тепловыделения ΔT_0 меняется при $n = 1,5$ от 12,5 до 20,2° С, а при $n = 2$ от 25 до 40,4° С.

Постановка задачи и описание установки

Из вышеизложенного следует, что исследование термических деформаций макета твэла должны проводиться в области перепадов температур до 40°C . При неизменном значении коэффициента теплоотдачи α по зазорам максимальный температурный перепад должен возникать на наружной рубашке. Однако ввиду меньшей жесткости внутренней рубашки совпадение точек с максимальным перепадом и с максимальными деформациями необязательно. Следовательно, измерение деформаций нужно проводить и на наружной рубашке, и на возможно большем числе внутренних рубашек. Поскольку макет является точной копией твэла, то перенос результатов эксперимента с макета на твэл вполне корректен.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Разогрев макета осуществлялся при помощи постоянного электрического тока. Для этих целей использовался агрегат АНД-5000/2500 (номинальная мощность 30 кВт). Охлаждение макета проводилось проточной водопроводной водой. Для создания необходимого перепада температур макет был разделен на две половины по поперечному сечению — охлаждаемую и неохлаждаемую.

Головка и хвостовик макета были изготовлены из эбонита. Подача воды осуществлялась таким образом, что достигалось одновременное охлаждение токоподводов. Токоподводящие шины выполнялись в виде пакета медных фольг толщиной 0,5 мм. Гибкость шин была достаточной, чтобы ликвидировать влияние токоподводов на жесткость макета.

Рубашки макета приваривались попеременно друг к другу в верхней и нижней частях сборки, для того чтобы, соединив все рубашки в последовательную электрическую цепь, увеличить общее сопротивление макета. При таком соединении электросопротивление макета составляло $3,7 \cdot 10^{-4}$ ом при $t = 0^\circ\text{C}$.

Рис. 1. Схема рабочего участка:

1 — вода; 2 — токоподводящие шины; 3 — резиновая оболочка; 4 — индикаторы; 5 — эбонитовая гребенка.

Крепление нижней части макета полностью соответствовало креплению твэла в опорной решетке сепаратора. Фиксация верхней части макета осуществлялась специальными винтами и допускала возможность свободного смещения по вертикали. Вдоль прорези штатива перемещался ползун, на котором были укреплены индикаторы (типа ИЧ с ценой деления 0,01 мм) для замеров деформаций.

Измерение стрелы прогиба осуществлялось на каждой грани макета. Температура стенок определялась при помощи 15 хромель-копелевых термопар диаметром 0,4 мм, расположенных в трех сечениях по высоте макета.

Методика эксперимента

После достижения стационарного режима (по самописцу) проводились замеры температур, деформаций и перепада напряжения ΔU на макете. Измерения ΔU были вызваны необходимостью регистрации рабочих токов генератора для расчета зависимости перепада температур от силы тока.

Из-за относительной большой величины температурного коэффициента сопротивления плотность тока по периметру макета менялась весьма значительно (при перепаде температур). В этих условиях сила тока J , проходящего через макет, определялась из уравнения

$$J = \frac{\Delta U}{2LR_0} \int_0^L \frac{dx}{1 + \beta t(x)}, \quad (8)$$

где β — температурный коэффициент сопротивления, $1/^\circ\text{C}$; R_0 — сопротивление рубашки при $t = 0^\circ\text{C}$; $t(x)$ — измеренное распределение температур по периметру.

В реальных условиях интеграл брался приближенно:

$$J \approx \frac{\Delta U}{12R_0} \sum_{i=1}^6 \frac{1}{1 + \beta t_i}. \quad (9)$$

Выборочная проверка расчета интеграла (8) по формуле (9) путем планиметрирования кривой $\frac{1}{1 + \beta t(x)}$ показала, что результаты расчетов по формулам (8) и (9) различаются не более чем на 2%.

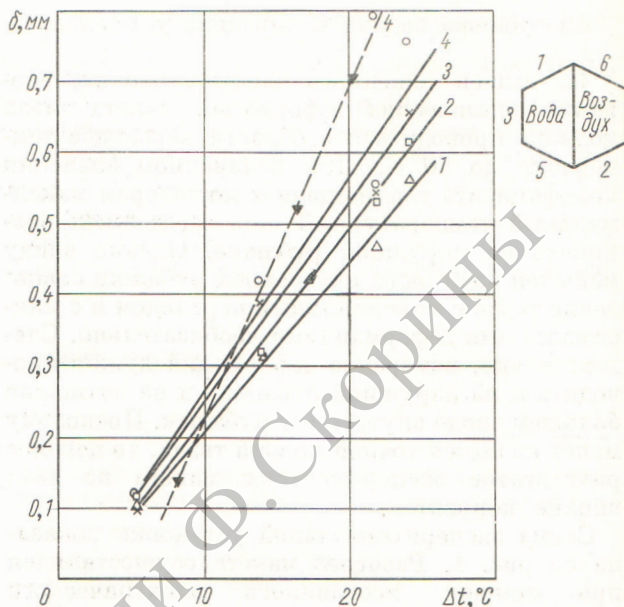
Конструкция экспериментального участка позволила определить деформации первой внутренней рубашки на неохлаждаемой стороне. С этой целью после серии испытаний по измерению деформаций на наружной рубашке на

неохлаждаемой стороне в каждом из трех сечений по высоте, где проводились измерения, было просверлено по три отверстия на осях граней. Повторные измерения при ранее проверенных режимах с целью проверки изменения жесткости наружной рубашки за счет сверлений показали отсутствие существенных изменений деформаций. При различных режимах было проведено одновременное измерение деформаций на наружной рубашке (охлаждаемые грани) и на внутренней (неохлаждаемые грани). В связи с тем, что измерение температур на внутренней рубашке не проводилось, температурные перепады в этом случае определялись расчетным путем (см. Приложение). По полученной расчетной зависимости перепада температур от силы тока были построены соответствующие кривые. Проверка показала хорошее совпадение результатов расчета с экспериментальными данными для наружной рубашки (при $J = 3500$ а величина $\Delta t = 12^\circ \text{C}$, а при $J = 4500$ а $\Delta t = 21^\circ \text{C}$). Это дало возможность считать результаты расчета надежными и использовать их при определении перепадов температур для внутренней рубашки. Практически кривые $\Delta t = f(J)$ для обеих рубашек почти одинаковы, что объясняется компенсацией увеличения внутреннего тепловыделения уменьшением расстояния между противоположными гранями рубашек, т. е. соответствующим уменьшением термического сопротивления перетоку тепла от неохлаждаемого участка к охлаждаемому.

Обсуждение результатов

Результаты измерений деформаций приведены на рис. 2—5. На рис. 2 показана зависимость величины прогиба стенки δ (мм) от Δt ($^\circ \text{C}$) в среднем сечении по высоте твэла. Изменение прогиба по высоте для различных граней макета приведено на рис. 3. На рис. 4 показано изменение прогибов по периметру рубашки в среднем сечении макета при различных Δt . Здесь же нанесены соответствующие температурные кривые. Рис. 5 содержит результаты одновременных измерений на внутренней и наружной рубашках для разных сечений по периметру при различных Δt .

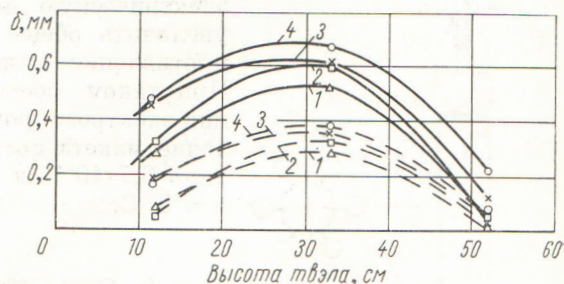
Прямые на рис. 2 получены путем обработки экспериментальных данных по методу наименьших квадратов [2]. Здесь же нанесена зависимость δ от Δt для внутренней рубашки в среднем сечении на грани 4. Как видно из графика, деформации внутренней рубашки в



Р и с. 2. Зависимость величины прогиба от перепада температур между гранями 4 и 3 в среднем сечении по высоте твэла: 1, 2, 3, 4 — номера граней; — — — — наружная рубашка твэла; - - - - - внутренняя рубашка твэла для грани 4. Экспериментальные результаты: O, V — грань 4 для наружной и внутренней рубашек твэла соответственно; Δ — грань 1; X — грань 3; □ — грань 2.

исследованном интервале изменения Δt оказываются примерно на 20% больше деформаций на соответствующей грани наружной рубашки, т. е. жесткость внутренней рубашки меньше, чем наружной.

Следует отметить, что в реальных условиях удельное тепловыделение во внутренних рубашках практически равно тепловыделению в наружных, а перепад температур в них меньше. В экспериментальной установке сила тока в обеих рубашках была одинаковой (последовательное соединение), поэтому удельное тепловыделение во внутренней рубашке выше, хотя



Р и с. 3. Распределение деформаций по высоте твэла: 1 — 4 — номера граней; — — — — $\Delta t = 24,2^\circ \text{C}$; - - - - - $\Delta t = 14^\circ \text{C}$. Обозначения экспериментальных точек см. на рис. 2.

перепады температур получились практически одинаковыми.

Необходимо заметить, что два противоположных фактора — уменьшение жесткости и уменьшение перепада температур для внутренней рубашки — в какой-то мере компенсируют друг друга, поэтому деформации наружной и внутренней рубашек должны быть примерно одинаковыми. Действительно, расчет ΔT по уравнению (7) подтверждает предположения авторов настоящей работы.

Как видно из рис. 2, в исследованном диапазоне изменений Δt зависимости $\delta = f(\Delta t)$ не проявляют тенденции к отклонению от линейности, т. е. возможна экстраполяция на близко расположенные участки.

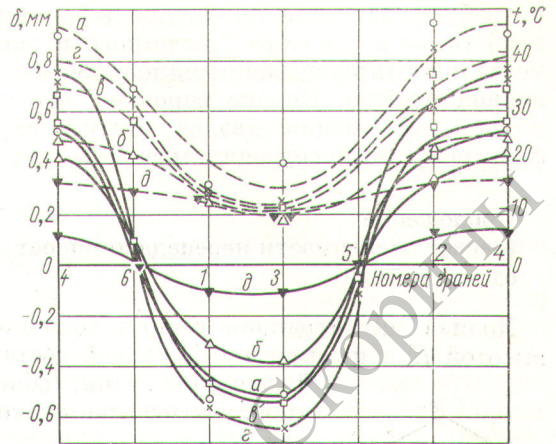
Из рис. 3 видно, что распределению деформаций по высоте макета свойственна некоторая асимметрия. Это объясняется различными способами заделки концов макета (2 степени свободы на верхней опоре и 1 степень свободы для нижней опоры), что характерно и для закрепления твэла в реакторе.

Распределение деформаций и температур по периметру наружной рубашки в среднем сечении, приведенное на рис. 4, показывает, что соответствующие профили температур и деформаций симметричны; с уменьшением Δt соответствующие профили сглаживаются; узлы жесткости (точки, где величина деформаций равна нулю) примерно совпадают с границами охлаждаемых и неохлаждаемых участков. Разброс точек, соответствующих узлам жесткости, для различных Δt вызван неточной установкой шупов индикаторов по центральной оси соответствующих граней. Эта же погрешность свойственна температурным кривым. Особенно большая погрешность в этом случае могла получаться на гранях 6, 1, 5, 2, поскольку на стыке охлаждаемого и неохлаждаемого участков производная dt/dx принимала максимальное значение.

В заключение следует указать, что все деформации были мизерными.

Таким образом, в настоящей работе получены следующие результаты:

1. Разработана методика одновременного измерения термических деформаций различных рубашек макета твэла кассетного типа.



Р и с. 4. Распределение температур и прогиба в среднем сечении твэла по периметру:

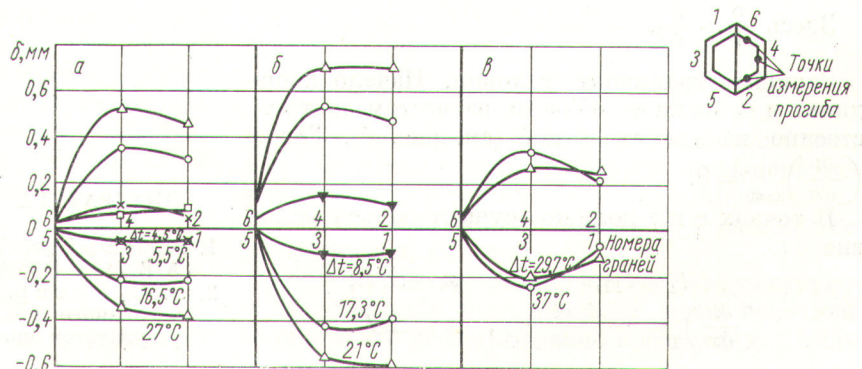
— кривые прогиба твэла; - - - кривые распределения температур. Кривые с одинаковыми буквенными индексами получены в одном эксперименте. Обозначения экспериментальных точек см. на рис. 2.

2. Получены расчетные данные о температурных перепадах в твэлах в зависимости от величины и степени неравномерности тепловыделения.

Установлено, что при перепадах температур $\sim 25^\circ\text{C}$ максимальные прогибы в среднем сечении составляют 0,6—0,7 мм.

4. Выведены расчетные формулы для определения зависимости перепада температур от силы тока для электрически обогреваемой коробчатой конструкции с учетом температурной зависимости омического сопротивления.

5. Поскольку зазоры между отдельными рубашками твэлов малы, полученные значения деформаций являются весьма существенными



Р и с. 5. Распределение деформаций по периметру твэла:

а — нижнее сечение; б — среднее сечение; в — верхнее сечение. Положительные значения деформаций относятся к внутренней рубашке твэла, отрицательные — к внешней. Деформации на внутренней рубашке относятся к Δt на внешней.

и требуют изучения поведения деформированного твэла в реакторе (расчетного и экспериментального исследования теплоотдачи в искривленной ячейке). Вполне вероятно, что термические деформации твэлов будут служить фактором, лимитирующим мощность реактора.

Приложение
(расчет зависимости перепада температур от силы тока)

Полная шестигранная секция толщиной δ , высотой H и периметром $4L$, где L составляет $3/2$ ширины грани, обогревается электрическим током силой J .

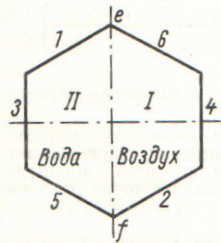


Рис. 6. Расчетная схема поперечного сечения твэла:

1 — 6 — номера граней.

Секция перегорожена по высоте непроницаемой перегородкой (рис. 6). В области I охлаждение воздушное, коэффициент теплоотдачи α_1 ; в области II охлаждение водяное, коэффициент теплоотдачи α_2 . Нужно определить стационарный температурный профиль по периметру рубашки, если H считать бесконечно большой; температура воздуха (средняя) t' , температура воды (средняя) t'' .

Запишем уравнение теплопроводности для областей I и II:

$$I. \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{q_v - \alpha_1 \frac{S}{V} (t - t')}{\lambda} = 0; \quad (10)$$

$$II. \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{q_v - \alpha_2 \frac{S}{V} (t - t'')}{\lambda} = 0. \quad (11)$$

Здесь $\frac{S}{V} = \frac{2}{\delta}$.

Запишем граничные условия. Начало координат для каждой области разместим соответственно на гранях 4 и 3 (см. рис. 6). Тогда

$$\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)_{x=0} = 0.$$

В точках e и f должно осуществляться условие

$$t_I = t_{II}, \quad x = \pm L;$$

$$\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)_I = -\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)_{II}, \quad x = \pm L.$$

Введем обозначения:

$$A = \frac{0,86R_0}{\lambda} J^2; \quad R_0 \text{ — сопротивление рубашки при } t = 0^\circ \text{C};$$

$$a_1^2 = \frac{2 \frac{\alpha_1}{\delta} - A\beta}{\lambda}, \quad a_2 = \frac{A + 2\alpha_1 \frac{t'}{\delta}}{\lambda};$$

$$b_1^2 = \frac{2 \frac{\alpha_2}{\delta} - A\beta}{\lambda}, \quad b_2 = \frac{A + 2\alpha_2 \frac{t''}{\delta}}{\lambda}.$$

Решение уравнений (10) и (11) при $a_1^2 = \frac{2 \frac{\alpha_1}{\delta} - A\beta}{\lambda} > 0$:

$$\Delta t = t_0 - t_3 = \left(\frac{a_2}{a_1^2} - \frac{b_2}{b_1^2}\right) \times \left(1 + \frac{b_1 \cdot \text{sh } b_1 L}{a_1 \cdot \text{sh } a_1 L} \right) \times \left(\frac{1}{\text{ch } b_1 L + \frac{b_1 \cdot \text{sh } b_1 L}{a_1 \cdot \text{sh } a_1 L}} - 1\right), \quad (12)$$

а при

$$a_1^2 = \frac{2 \frac{\alpha_1}{\delta} - A\beta}{\lambda} < 0:$$

$$\Delta t = t_0 - t_3 = \left(\frac{a_2}{a_1^2} - \frac{b_2}{b_1^2}\right) \times \left(\frac{\frac{b_1 \cdot \text{sh } b_1 L}{a_1 \cdot \text{sh } a_1 L} - 1}{\frac{b_1 \cdot \text{sh } b_1 L \text{ ctg } a_1 L - \text{ch } b_1 L}{a_1}} - 1\right). \quad (13)$$

Рассчитанные по формулам (12) и (13) зависимости $\Delta t = f(J)$ были подтверждены экспериментально.

Поступила в Редакцию 17/XI 1965 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Rapier, T. Jones. J. Nucl. Energy, **19**, A/B, 145 (1965).
2. Р. С. Гутер, Б. В. Овчинский. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта. М., Физматгиз, 1962.