и найти средний пробег по трубке $\lambda_{ср}$. Как правило, частицы, возникающие в зоне пучка, имеют более длинные пробеги, чем частицы, образующиеся на электродах, и вносят, по-видимому, основной вклад в рентгеновское облучение изолятора трубки и образование пробоев.

Рассматривались три типа фокусирующих систем: с магнитными и электростатическими квадрупольными линзами, а также с аксиально симметричными магнитными линзами. В условиях, когда эти три канала эквивалентны по фокусировке основного пучка, их вторичноэлектронные характеристики оказываются существенно различными. Наименьшие значения $\lambda_{ср}$ и, следовательно, более высокую электрическую прочность трубки обеспечивают магнитные квадруполи.

Качественный анализ позволил найти условия, при которых пробеги основной массы вторичных электронов меньше длины L_0 периода ФОДО структуры квадрупольного канала: для магнитных квадруполей $\lambda \leqslant L_0$, если $\operatorname{ch} \frac{1}{2}\left(\frac{G_m^2 L_0^3}{E_0}\cdot\frac{e}{m}\right)^{1/4} \gg 1$; для электростатических квадруполей $\lambda \leqslant L_0$, если $\operatorname{ch} \frac{1}{2}\left(\frac{G_E L_0}{E_0}\right)^{1/2} \gg 1$. Здесь G_m — градиент поля магнитной линзы, *тл/м*; G_E — градиент поля электростатической линзы, *в/м²*; E_0 — средняя напряженность ускоряющего поля, *в/м*; L_0 — период ФОДО структуры канала, *м*.

Как и в ранних конструкциях трубок с аксиально симметричными электростатическими линзами, увеличение апертуры канала повышает $\lambda_{ср}$ и снижает электрическую прочность.

(**№ 218/4677.** Статья поступила в Редакцию 9/I 1968 г., аннотация — 5/V 1968 г. Полный текст 0,6 а. л., 3 рис., 8 библиографических ссылок.)

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Van de Graaf et al. Nature, **195**, 1293 (1962).
2. L. Purser et al. Rev. Scient Instrum., **36**, 453 (1965).
3. Е. А. Абрамян, В. В. Вечеславов. «Атомная энергия», **22**, 400 (1967).

Расчет естественной циркуляции в контуре водо-водяного реактора

В. М. СЕЛИВАНОВ, А. А. ГОРЕВ, В. Ф. КЛИМОВА, И. И. ЗДВИЖКОВ

УДК 621.039.534.2

Уровень мощности реактора, снимаемой за счет естественной циркуляции однофазного теплоносителя, определяется в первую очередь относительным расположением активной зоны и парогенератора, а также сопротивлением контура. В тех системах, где высота контура циркуляции невелика, а высота активной зоны и парогенератора сравнимы с ней или равны, естественная циркуляция в контуре в значительной мере зависит от распределения температуры в нем. Задача гидравлического и теплового расчетов контура для аппарата известной геометрии сводится при этом к решению системы дифференциальных уравнений сохранения энергии и количества движения. Решение этой задачи требует известных затрат времени.

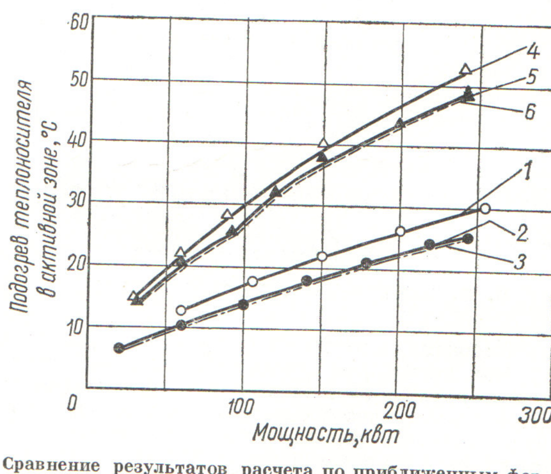
Вместе с тем известно, что в том случае, когда источники нагрева и охлаждения разнесены по высоте контура, естественная циркуляция однофазного теплоносителя в нем достаточно хорошо описывается на основании представления о линейном распределении температур теплоносителя на участках с теплообменом.

В настоящей статье путем сравнения приближенного решения с использованием линейной модели и точного решения уравнений сохранения энергии и количества движения определяется граница возможного применения линейной аппроксимации. Делается также попытка учесть нелинейность распределения температуры по высоте парогенератора при использовании линейной модели. Учет этой нелинейности проводится в геометрическом параметре контура ψ, который в линейном приближении численно равен расстоянию по высоте между геометрическими центрами активной зоны и парогенератора. При учете нелинейности ψ определяется следующим образом:

$$\psi = H_{к} - \frac{H_{а.з}}{2} - z_{ср},$$

где $H_к$ — высота контура циркуляции; $H_{а.з}$ — высота активной зоны;

$$z_{ср} = H_{пг}\left[\frac{Gc_p}{kF} - \frac{\exp\left(-\frac{kF}{Gc_p}\right)}{1-\exp\left(-\frac{kF}{Gc_p}\right)}\right]$$



Сравнение результатов расчета по приближенным формулам с экспериментом.

Компоновка, при которой парогенератор расположен на уровне нижней кромки активной зоны: *1* — линейная аппроксимация, *2* — откорректированная модель, *3* — эксперимент; компоновка, при которой парогенератор приподнят над активной зоной: *4* — линейная аппроксимация, *5* — откорректированная модель, *6* — эксперимент.

в случае, если со стороны второго контура температура в парогенераторе по высоте постоянна; $H_{\text{пг}}$ — высота парогенератора; k — коэффициент теплопередачи; F — поверхность теплообмена; C_p — удельная теплоемкость; G — расход теплоносителя.

Аналогичное выражение получено для теплообменника, когда температура со стороны второго контура непостоянна по высоте.

Линейная модель и модель с вышеуказанной корректировкой проверялись экспериментально для двух компоновок контура циркуляции. Сравнение точного решения с линейным приближением показало, что линейная аппроксимация дает удовлетворительное согласие в случае

$$\frac{H_{\text{а.з}}}{H_{\text{к}}} \leqslant 0{,}7.$$

Отличие экспериментальных данных от расчетов по линейной модели не превышает 25%, а от данных, полученных на корректированной модели,— не более 3% (см. рисунок).

(**№ 219/4619.** Статья поступила в Редакцию 15/XI 1967 г., аннотация — 14/V 1968 г. Полный текст 0,4 а. л., 4 рис.)

Выбор программы изменения температуры теплоносителя

Б. Г. ВОЛИК, Н. А. ДОЛГИНОВА

УДК 621.039.517.5

При проектировании систем управления реакторами повышенной маневренности необходимо знать программу наиболее скорого изменения температуры теплоносителя $T(t)$, гарантирующую вместе с тем надежную работу технологического оборудования (с точки зрения прочности). Для цилиндрических конструкций, внутренние стенки которых находятся в контакте с теплоносителем, а внешние имеют тепловую изоляцию, такая программа может быть определена из условия экспоненциального закона изменения температурных напряжений $\sigma(t)$ в наиболее опасной точке (на внутренней стенке):

$$\sigma(t) = [\sigma]\,(1 - e^{-bt}), \tag{1}$$

где $b > 0$. Такой закон исключает переменное нагружение и тем самым повышает долговечность материалов конструкции.

Решив совместно уравнение теплопроводности для стенки цилиндра с граничными условиями третьего рода при некоторых допущениях

$$\frac{\partial \vartheta(y, t)}{\partial t} = a\,\frac{\partial^2 \vartheta(y, t)}{\partial y^2} \tag{2}$$

и уравнение для тангенциальных температурных напряжений

$$\sigma = \frac{\beta E}{1-\nu}\left[\frac{2}{R_a^2 - R_i^2}\int_{R_i}^{R_a} \vartheta(x, t)\,x\,dx - \vartheta(R_i, t)\right] \tag{3}$$

и введя преобразование Лапласа, получим трансцендентную передаточную функцию:

$$W_\sigma(s) = \frac{\sigma(s)}{T(s)}.$$

Здесь ϑ — температура стенки; x, y — расстояние от центра цилиндра и от внешней поверхности цилиндра до рассматриваемой точки в сечении стенки соответственно; a — коэффициент температуропроводности; R_i, R_a — внутренний и внешний радиусы цилиндра соответственно.

При помощи логарифмических частотных характеристик удается оценить диапазон существенных частот и найти аппроксимирующую дробно-рациональную передаточную функцию

$$W_{\sigma 1}(s) = \frac{\sigma(s)}{T(s)} = \frac{ks}{(1+\tau_1 s)(1+\tau_2 s)}. \tag{4}$$

На рисунке приведена номограмма зависимости величин τ_1, τ_2 от теплофизических параметров.

Уравнения (1), (4) и дополнительное ограничение на характер изменения температуры теплоносителя ($\dot{T} \geqslant 0$ при подъеме температуры и $\dot{T} \leqslant 0$ при снижении) дают искомую программу:

$$T(Fo) = B + CFo + De^{-bFo}, \tag{5}$$

где B, C, D — постоянные.

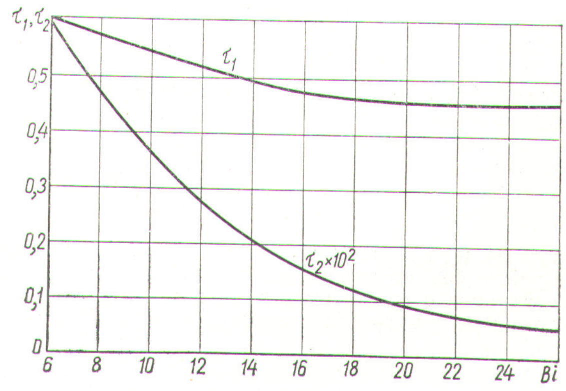
Программа (5) приближенно может быть заменена начальным скачком

$$T_0 = \frac{[\sigma]}{A}\cdot\frac{\tau_1+\tau_2}{k_1} \tag{6}$$

и последующим линейным изменением

$$\dot{T} = \frac{[\sigma]}{Ak_1}. \tag{7}$$

В приведенных выше уравнениях $[\sigma]$ — допустимые напряжения; $A = \frac{\beta E}{1-\nu}$; β, E, ν — коэффициент линей-



Зависимость τ_1, τ_2 от теплофизических параметров.