

КОМПЬЮТЕРНЫЙ ОБРАБОТКА

621.039

К-59

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Л. С. Кокорев

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ
ГАЗООХЛАЖДАЕМОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА
С МИКРОТВЭЛАМИ

МОСКВА 1982

621.039
K-59

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Л.С.Кокорев

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ
ГАЗООХЛАЖДАЕМОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА
С МИКРОТВЭЛАМИ

Утверждено редсоветом
института в качестве
учебного пособия

45

УЧЕБНЫЙ ФОНД
Б-КИ МИФИ

Москва 1982

621.039.534(075)

621.039.53

К о к о р е в Л.С. Тепловой расчет газоохлаждаемого ядерного реактора с микротвэлами. Учебное пособие.-М.:Изд-во МИФИ, 1982, 16 с.

В учебном пособии рассматривается оптимизационная задача теплогидравлического расчета активной зоны газоохлаждаемого реактора с микротвэлами применительно к выполнению курсового проекта студентами старших курсов факультета технической физики по курсу "Инженерные расчеты и проектирование ядерных энергетических установок".

Рецензенты: Б.В.Петунин, А.Г.Харламов

© Московский инженерно-физический институт, 1982г.

СОДЕРЖАНИЕ

Цель теплового расчета. Описание переменных	4
Энергетические и материальные затраты в реакторе.....	5
Поле температур в реакторе.....	7
Гидравлический расчет.....	8
Исследование целевой функции на экстремум.....	9
Список рекомендуемой литературы.....	14

ЦЕЛЬ ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА. ОПИСАНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ

Характеристикой эффективности работы какого-либо энергетического устройства может служить некоторая целевая функция, зависящая от набора переменных X_i и параметров C_j : $F\{X_i; C_j\}$. Применительно к ЯЭУ такой функцией может быть себестоимость электроэнергии, приведенные затраты, период удвоения ядерного топлива для БР, минимум веса для КЭУ и т.д. Тогда задача расчета заключается в построении целевой функции и ее исследовании на экстремум. Необходимо установить уравнения связи между переменными и определить допустимые области их изменения, исходя из условия безопасной эксплуатации энергетической установки.

В тепловом расчете активной зоны газоохлаждаемого реактора с микротвэлами в качестве независимых переменных можно принять температуры теплоносителя на входе и выходе активной зоны

$T_{вх}$, $T_{вых}$ (или среднюю температуру теплоносителя $T_{ср}$ и подогрев ΔT), тепловую мощность активной зоны Q , среднюю теплонапряженность q_v , диаметр твэла $d_{тв}$, объемную долю твэлов $\epsilon_{тв}$, давление теплоносителя p , коэффициент уплощения активной зоны $\beta = H/D$.

Зависимыми переменными в таком случае будут: расход теплоносителя $G = Q/(c_p \Delta T)$, его средняя массовая скорость $(\rho u)_{ср} = G/S_{ТН}$, температуры оболочки твэла T_c и центра ядерного топлива $T_{ц}$. На максимальную температуру топлива накладывается ограничение: $T_{тц} \leq T_{доп}$.

Параметрами теплового расчета служат теплофизические свойства ядерного топлива, конструкционных материалов и теплоносителя, прочностные характеристики материалов, коэффициенты неравномерности энерговыделения по высоте и радиусу активной зоны K_z , K_r , стоимости топлива, материалов и энергии C_f , C_m , C_e , период эксплуатации установки t_p .

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И МАТЕРИАЛЬНЫЕ ЗАТРАТЫ В РЕАКТОРЕ

Элементарный поток тепла dQ , сообщаемый теплоносителю в реакторе с локальной температурой T , можно преобразовать в работу в соответствии с теоремой Карно

$$dP = dQ \left(1 - \frac{T_0}{T}\right),$$

где T_0 - температура теплоприемника (окружающей среды).

Отсюда элементарная потеря энергии, обусловленная ограничением температуры ядерного топлива, теплообменом в твэлах и теплоносителе составит

$$dP' = dQ - dP = dQ \frac{T_0}{T}.$$

Используя дифференциальное соотношение материально-теплого баланса $dQ = G c_p \Delta T$, получим выражение для интегральной потери:

$$P' = \int dP' = G c_p T_0 \ln \frac{T_{\text{вых}}}{T_{\text{вх}}} \approx T_0 \frac{Q}{T},$$

где $T_{cp} = (T_{\text{вх}} + T_{\text{вых}})/2$.

Мощность, затрачиваемая на прокачивание теплоносителя через реактор,

$$N = \frac{\Delta p G}{\rho \eta_n} \quad (1)$$

переходит в теплоту трения, которая частично также преобразуется в полезную внешнюю работу. Необратимые затраты мощности на прокачивание будут

$$P'' = T_0 \frac{N}{T_{cp}}.$$

Таким образом, суммарные необратимые затраты мощности на теплообмен и трение:

$$P_j = P' + P'' = \frac{T_0}{T_{cp}} (Q + N). \quad (2)$$

Оценим теперь материальные затраты, приходящиеся на изготовление и эксплуатацию основных частей активной зоны. Масса делящегося ядерного топлива, выгорающего в единицу времени, пропорциональна тепловой мощности реактора:

$$\frac{dm_g}{dt} = \frac{Q}{q_g},$$

где q_g - теплотворная способность ядерного топлива.

Масса твэлов в объеме активной зоны:

$$m_{гв} = V_{аз} \epsilon_{гв} \rho_{гв}, \quad (3)$$

где $\rho_{гв} = (\epsilon_g \rho_g + \epsilon_o \rho_o) / (\epsilon_g + \epsilon_o)$ (я- топливо, о- оболочка).

Масса корпуса, находящегося под давлением теплоносителя p , со средним диаметром D_k и высотой H_k , толщиной стенки δ_k :

$$m_k = (\pi D_k H_k + \frac{\pi D_k^2}{4} \cdot 2) \delta_k \rho_k.$$

Из условия прочности цилиндрического корпуса с допустимым напряжением σ_d (с учетом ослабления, вызванного наличием отверстий для регулирующих стержней и перегрузочного устройства):

$$\delta_k = \frac{D_k p}{2 \sigma_d}.$$

Отсюда получим выражение для массы корпуса:

$$m_k = V_{аз} \rho_k \frac{p}{\rho_k}, \quad (4)$$

где $\frac{1}{\rho_k} = \frac{2}{\sigma_d} \left(1 + \frac{D_k}{2H_k}\right) \cdot \frac{D_k}{D_{аз}} \cdot \frac{H_k}{H_{аз}}$

(к- корпус, аз- активная зона).

Число твэлов в объеме активной зоны

$$n_{гв} = \frac{6 V_{аз} \epsilon_{гв}}{\pi d_{гв}^3}. \quad (5)$$

Стоимость твэлов складывается из стоимости материалов и изготовления. Полагая вторую составляющую пропорциональной числу твэлов, для стоимости твэлов получим выражение

$$C_{TB} = C_{TB1} m_{TB} + C_{TB2} n_{TB} = \\ = V_{03} \epsilon_{TB} (C_{TB1} \rho_{TB} + C_{TB2} \frac{6}{\pi d_{TB}^3}). \quad (6)$$

ПОЛЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В РЕАКТОРЕ

Решая задачу стационарной теплопроводности для сферического твэла с диаметром ядра d_k , толщиной оболочки δ и коэффициентом теплоотдачи α на его поверхности, можно получить выражение для перепада температуры между центром твэла и теплоносителем:

$$\Delta T = q_c \left[\frac{1}{\alpha} + d_{TB} \left(\frac{\delta_r}{\lambda_0} + \frac{1 + 2\delta_r}{4\lambda_k} \right) \right], \quad (7)$$

где $\delta_r = \delta/d_k$; λ_0, λ_k - коэффициенты теплопроводности оболочки и материала ядра (ядерного топлива), $q_c = q_v d_{TB} / (6 \epsilon_{TB})$.

Относительную толщину оболочки микротвэла δ_r можно оценить из условия прочности $\delta_r = \rho_r / (4 \sigma_d)$, где σ_d - допустимое напряжение для материала оболочки, ρ_r - давление газообразных продуктов деления, возрастающее с увеличением температуры и глубины выгорания.

Полагая распределение энерговыделения по высоте активной зоны в виде усеченного косинуса $q_c = q_{mc} \cos \gamma Z$, где $Z = 2z/H_{03}$, $\gamma = \pi / (2(1 + 2\Delta/H_{03}))$, Δ - экстраполированная добавка, учитывающая влияние отражателя, можно получить уравнение связи между максимальной температурой топлива T_{mc} , средней температурой теплоносителя T_{cp} , максимальным температурным перепадом между центром твэла и теплоносителем ΔT_{mc} и подогревом теплоносителя в активной зоне ΔT :

$$(T_{mc} - T_{cp})^2 = \Delta T_{mc}^2 + \left(\frac{\Delta T}{2 \sin \gamma} \right)^2. \quad (8)$$

Коэффициент теплоотдачи α в шаровой засыпке определяется эмпирическим уравнением [1] :

$$\alpha / (c_p \rho u) \equiv St = 0,58 Re_d^{-0,3} Pr^{-0,7}, \quad (9)$$

где скорость теплоносителя u отнесена к полному сечению засыпки, а число Рейнольдса $Re_d = (\rho u d_{78}) / \mu$.

В кольцевом твэле высотой h , ограниченном цилиндрическими пористыми стенками с диаметрами d_1 и d_2 , средняя массовая скорость радиального течения теплоносителя

$$(\rho u)_{cp} = G / (n_k \pi d_2 h), \quad \text{где число топливных кассет}$$

$$n_k = S_{a3} 4 / (\pi d_k^2), \quad (10)$$

(d_k - эквивалентный диаметр топливной кассеты).

Среднюю массовую скорость можно выразить через независимые переменные теплового расчета:

$$(\rho u)_{cp} = \frac{q_v}{c_p \Delta T} K_p. \quad (11)$$

где $K_p = d_k / (4 d_2 h / H)$, а для центра активной зоны

$$(\rho u)_m = (\rho u)_{cp} K_r. \quad (12)$$

Выражение для коэффициента теплообмена через независимые переменные примет вид:

$$\alpha = 0,58 \frac{\lambda}{d_{78}} Pr^{0,3} \left(\frac{d_{78}}{\mu} K_r \frac{q_v d_2}{c_p \Delta T} K_p \right)^{0,7}. \quad (13)$$

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

Гидравлические потери в центральной кассете соответственно для трубчатого канала с диаметром d_1 , кольцевого канала с внутренним и наружным диаметрами d_2 и d_1 , цилиндрического слоя сферических твэлов с внутренним и наружным диаметрами d_1 и d_2 имеют вид:

$$\Delta p_1 = \frac{\xi_1 H}{2 \rho d_1} \left(\frac{4G}{n_k \pi d_1^2} \right)^2 k_1^2;$$

$$\Delta p_2 = \frac{\xi_2 H}{2 \rho (d_k - d_2)} \left(\frac{4G}{n_k \pi (d_k^2 - d_2^2)} \right)^2 k_2^2;$$

$$\Delta p_w = \frac{\xi_w d_2}{4 \rho d_{10}} \left(\frac{d_2}{d_1} - 1 \right) m \left(\frac{Gm}{n_k \pi d_2 H} \right)^2 k_2^2;$$

где $m = H/h$ - число твэлов в топливной кассете по ее высоте.

Выражая перепады давления через независимые переменные, получим:

$$\Delta p_1 = \frac{2 \xi_1 Q q_v (\beta k_1)^2}{\pi \rho (c_p \Delta T)^2 d_1} \left(\frac{d_k}{d_1} \right)^4;$$

$$\Delta p_2 = \frac{2 \xi_2 Q q_v (\beta k_2)^2}{\pi \rho (c_p \Delta T)^2 (d_k - d_2)} \left(\frac{d_k^2}{d_k^2 - d_2^2} \right)^2; \quad (I4)$$

$$\Delta p_w = \frac{1}{64} \cdot \frac{\xi_w}{\rho} \left(\frac{d_2}{d_1} - 1 \right) m^3 \cdot \frac{q_v^2 k_2^2}{(c_p \Delta T)^2} \cdot \frac{d_k^4}{d_2 d_{10}}.$$

Суммарные гидравлические потери $\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_w$.

Коэффициент гидравлического сопротивления в хаотической засыпке шаров выражается эмпирическим уравнением [I] :

$$\xi_w = 109 Re_w^{-0,14}, \quad (I5)$$

а в гладкой трубе и кольцевом канале $\xi_i = 0,184 Re_i^{-0,2}$,
 $i = 1, 2$; $Re_1 = 4 \rho G d_1 / (n_k \pi d_1^2 \mu)$, $Re_2 = 4 \rho G / (n_k \pi (d_k + d_2) \mu)$.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ НА ЭКСТРЕМУМ

В качестве целевой функции для оптимизации выделим составляющую затрат, включающую в себя стоимости необратимых затрат мощности на теплообмен и трение в активной зоне, стоимости твэлов и корпуса:

$$C_3 = C_2 P_3 + (C_{T01} m_{T0} + C_{T02} n_{T0}) / t_{T0} + C_K m_K / t_K \quad (16)$$

где C_2 - стоимость электроэнергии (р/Дж), t_{T0} и t_K - периоды работы твэлов и корпуса.

Используя полученные ранее соотношения, можно сделать некоторые качественные выводы относительно влияния переменных ΔT , T_{cp} , q_v , d_{T0} , ϵ_{T0} , β и ρ при заданных значениях Q , κ_v , κ_r и $T_{mц}$.

Энергетические затраты P_3 достигают минимального значения в зависимости от подогрева ΔT . С увеличением ΔT снижается T_{cp} и, следовательно, возрастает необратимые потери мощности на теплообмен. С другой стороны, увеличение ΔT приводит к снижению расхода и уменьшению затрат мощности на прокачивание.

Затраты мощности на прокачивание N (или гидравлические потери Δp) имеют минимум в зависимости от геометрических размеров топливной кассеты d_1 , d_2 и d_K (при фиксированной объемной доле твэлов).

С увеличением теплонапряженности q_v уменьшаются материальные затраты, но увеличиваются энергетические потери.

Увеличение диаметра твэла d_{T0} снижает гидравлические потери, увеличивает необратимые потери на теплообмен.

По мере роста давления теплоносителя уменьшаются затраты мощности на прокачивание, но увеличивается масса корпуса.

Таким образом, возникает задача отыскания многомерного экстремума целевой функции. Итерационные методы экстремальных задач рассматриваются, например, в справочнике [2, с.575]. Наиболее простым способом поиска минимума функции многих переменных

$$F\{X_1, X_2, \dots, X_n\} \rightarrow \min$$

является последовательное изменение переменных X_1, X_2, \dots

X_n на каждом шаге итераций.

Сходимость процесса итераций и объем вычислительной работы будут зависеть существенно от выбора 0-го приближения для переменных $X_i^{(0)}$. Для этого можно воспользоваться либо имеющимися в литературе данными для реакторов аналогичного типа, либо выполнить предварительные приближенные оценки.

Обозначив $d_1/d_k = x$, $d_2/d_k = y$, для суммарного гидравлического сопротивления центральной кассеты из уравнений (14) можно получить выражение:

$$\Delta p = \frac{\kappa_r^2 q_v}{\rho (C_p \Delta T)^2} \cdot \left\{ \frac{2 \xi Q \beta^2}{\pi d_k} \left(\frac{1}{x^5} + \frac{1}{(1-y)(1-y^2)^2} \right) + \frac{m^3 \xi_w}{64} \cdot \frac{q_v d^3}{d_{10}} \cdot \frac{1}{y^2} \left(\frac{y}{x} - 1 \right) \right\}.$$

Объемная доля твэлов

$$\epsilon_{тв} = 0,6 (y^2 - x^2). \quad (17)$$

Можно заметить, что суммарное гидравлическое сопротивление имеет минимум в зависимости от диаметра кассеты при его значении

$$d_k = \left(\frac{128}{3\pi} \cdot \frac{\xi Q \beta^2 d_{10}}{m^3 \xi_w q_v} \right)^{1/4} \cdot \left[\frac{y^2 x}{y-x} \left(\frac{1}{x^5} + \frac{1}{(1-y)^3(1+y)^2} \right) \right]^{1/4},$$

величина которого

$$\Delta p = \frac{q_v \kappa_r^2}{\rho (C_p \Delta T)^2} \cdot \left(\frac{2 \xi Q \beta^2}{3\pi} \right)^{3/4},$$

где функция переменных x, y

$$\varphi(x, y) = \frac{1}{x^4 y^4} \left[\left(1 + \frac{x^5}{(1-y)^3(1+y)^2} \right)^3 (y-x) \right]^{1/4}. \quad (18)$$

При фиксированной объемной доле твэлов из уравнений (17) и (18) можно определить минимальную величину $\varphi_m(x, y) = \varphi_m(\epsilon_{тв})$ как функцию объемной доли твэлов.

При заданной величине максимальной температуры центра топлива можно получить зависимость для средней температуры теплоносителя от независимых переменных:

$$T_{cp} = T_{m4} - \left\{ \left[\frac{\kappa_v q_v d_{10}}{6 \epsilon_{10}} \left(\frac{d_{10}^{0.3} \Delta T^{0.7}}{C q_v^{0.7}} + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + d_{10} \left(\frac{\delta_x}{\lambda_0} + \frac{1+2\delta_x}{4\lambda_x} \right) \right]^2 + \left(\frac{\Delta T}{2 \text{Sin} \varphi} \right)^2 \right\}^{1/2}$$

где $C = [0,58 P_r^{0.3} \lambda / (\mu C_p)^{0.7}] \cdot \kappa_{\text{ф}} d_x$.

Имея в виду также зависимости плотности газа от средней температуры и давления $\rho = p / (R T_{cp})$ и расхода теплоносителя от его подогрева $G = Q / (C_p \Delta T)$, можно исследовать составляющую энергетических затрат в зависимости от подогрева газа. В области малых значений ΔT : $P_3 \sim (\Delta T)^{-3}$, а при больших ΔT - слабо возрастающая функция, близкая к линейной.

Аналогично можно получить аналитическую зависимость суммарных затрат от давления в реакторе вида:

$$C_3 = C + A\rho + \frac{B}{\rho^2} \rightarrow \min,$$

где C , A и B - известные функции остальных переменных. Отсюда для условий экстремума имеем

$$\rho = (2B/A)^{1/3}; \quad C_3 = C + \frac{3}{2} A^{2/3} (2B)^{1/3}.$$

С целью выбора нулевого приближения в таблице приводятся некоторые проектные параметры газоохлаждаемых реакторов с микрострелами [3].

Структура и состав микрострел реакторов типа GBR с ядерным топливом (U, Pu) $O_{2,94}$: пористость топлива 15%, диаметр топливного сердечника (керна) 850 мкм, внутренний слой покрытия PuC с пористостью 50% и толщиной 45 мкм, поглощающий газообразные продукты деления; герметизирующий слой PuS_2 5-10 мкм, силовой слой $PuSi$ 40 мкм. Максимальная температура ядерного топлива составляет 950°C .

Таблица

Параметры газоохлаждаемых реакторов с микротвэлами

Параметр	Размерность	тип реактора	
		GBR-2	GBR-3
Теплоноситель	-	гелий	углекислый газ
Давление теплоносителя	Мпа	12,0	6,0
Температура входа	°C	260	260
Температура выхода	°C	700	650
Выгорание	МВт·с/т	10 ⁵	10 ⁵
Интегральный поток нейтронов	нейтр./см ²	2,1·10 ²³	1,1·10 ²³
Время пребывания твэлов в реакторе	год	0,82	0,82
Числоборок ^{х)}	-	61	61
Шаг между сборками	м	0,362	0,370
Мощность на прокачку	МВт	78	88
Электрическая мощность	МВт	1000	1000
Давление пара	Мпа	11,5	11,5
Температура пара	°C	540	540
Загрузка ядерного топлива	кг	2800	2800
КВ	-	1,36	1,36
Время удвоения	год	16	16

х) Сборка состоит из 7-ми твэлов с перфорированными трубами из хромоникелевых сплавов с шириной щели 0,25 мм.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богоявленский Р.Г. Гидродинамика и теплообмен в высокотемпературных реакторах с шаровыми твэлами. - М.: Атомиздат, 1978, 112с.
2. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. - М.: Изд-во Наука, 1970, 720с.
3. Атомная техника за рубежом, 1973, №3, с.14-21; 1973, №9, с.14-20; 1978, №2, с.14-19.

Лев Сергеевич Кокорев
Тепловой расчет
газоохлаждаемого ядерного реактора
с микротвэлами

Редактор И.А.Астаховская
Техн.редактор З.И.Хазова

Л-90808

Подписано в печать 18/II-82г. Формат 60×84^{1/16} Объем 1,0 п.л.
Уч.-изд.л. 0,75 Тираж 150 экз. Цена 10 коп. Изд.М102-1
Заказ 2724

Типография МИФИ, Каширское шоссе, 51