

УДК 621.165

Д. А. Переверзев, д-р техн. наук**Н. Ю. Бабак**, канд. техн. наук**Ж. А. Шелехина**Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины
(г. Харьков, e-mail: shuben@kharkov.ua)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОБЪЕМНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОСТЫВАНИЯ ПАРОВЫХ ТУРБИН ПОСЛЕ ОСТАНОВОК МОЩНЫХ ЭНЕРГОБЛОКОВ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Усовершенствована объемная (трехмерная) математическая модель процесса остывания цилиндров (отсеков) турбин с реализацией ее замкнутой системой аналитических зависимостей, полученных с учетом теплового взаимодействия всех тел, составляющих цилиндр (ротор, корпуса, обоймы, диафрагмы и т.п.). Предложена объемная математическая модель в виде комбинаций непрерывных аналитических и конечно-разностных закономерностей, где аналитические зависимости описывают баланс тепла в радиальном направлении, а конечно-разностные – в окружном и осевом.

Вдосконалена об'ємна (тривимірна) математична модель процесу охолодження циліндрів (відсіків) турбін з реалізацією її замкнутою системою аналітичних залежностей, отриманих з урахуванням теплової взаємодії усіх тіл, що становлять циліндр (ротор, корпуси, обойми, діафрагми тощо). Запропонована об'ємна математична модель у вигляді комбінацій безперервних аналітичних і кінцево-різницевих закономірностей, де аналітичні залежності описують баланс тепла в радіальному напрямі, а кінцево-різницеві – в окружному і осьовому.

Введение

Выявление закономерностей остывания паровых турбин и управление этими процессами в период остановок различной продолжительности является одним из эффективных путей повышения маневренности и надежности мощных энергоблоков тепловых электростанций (ТЭС). Поэтому решение данных вопросов при проектировании и эксплуатации мощных паротурбинных агрегатов весьма актуально.

На рис. 1 представлена конструктивная схема цилиндров высокого и среднего давления (ЦВД и ЦСД) мощной паровой турбины с граничными условиями теплообмена, что дает возможность разработать объемную математическую модель, позволяющую ставить и решать трехмерную задачу остывания цилиндров. Здесь рассматривается тепловое взаимодействие трех тел: ротора, внутреннего и внешнего корпусов, где $\lambda_1, c_1, t_1, P_1, \lambda_2, c_2, t_2, P_2, \lambda_3, c_3, t_3, P_3$ – соответственно коэффициенты теплопроводности и теплоемкости, температуры и веса (массы) исследуемых тел. Массы диафрагм, сегментов уплотнений и др. более мелких деталей присоединены к исходным массам обойм и внутреннего корпуса с тем, чтобы общая масса цилиндра была выдержана равной проектной величине. Остальные обозначения: $K_0, t_{c0}, F_0, K_1, F_1, K_2, F_2, K_3, t_{c3}, F_3$ – граничные условия и площади теплообмена исследуемых тел; α_v и t_v (t_{c3}) – коэффициент теплоотдачи и температура окружающего воздуха. В данной схеме они намечены ориентировочно и будут конкретизироваться по ходу решения поставленных задач.

Согласно данным натурных испытаний было принято, что в радиальном направлении по толщине исследуемых тел температура выровнена, а изменяется в них – только в окружном и осевом направлениях.

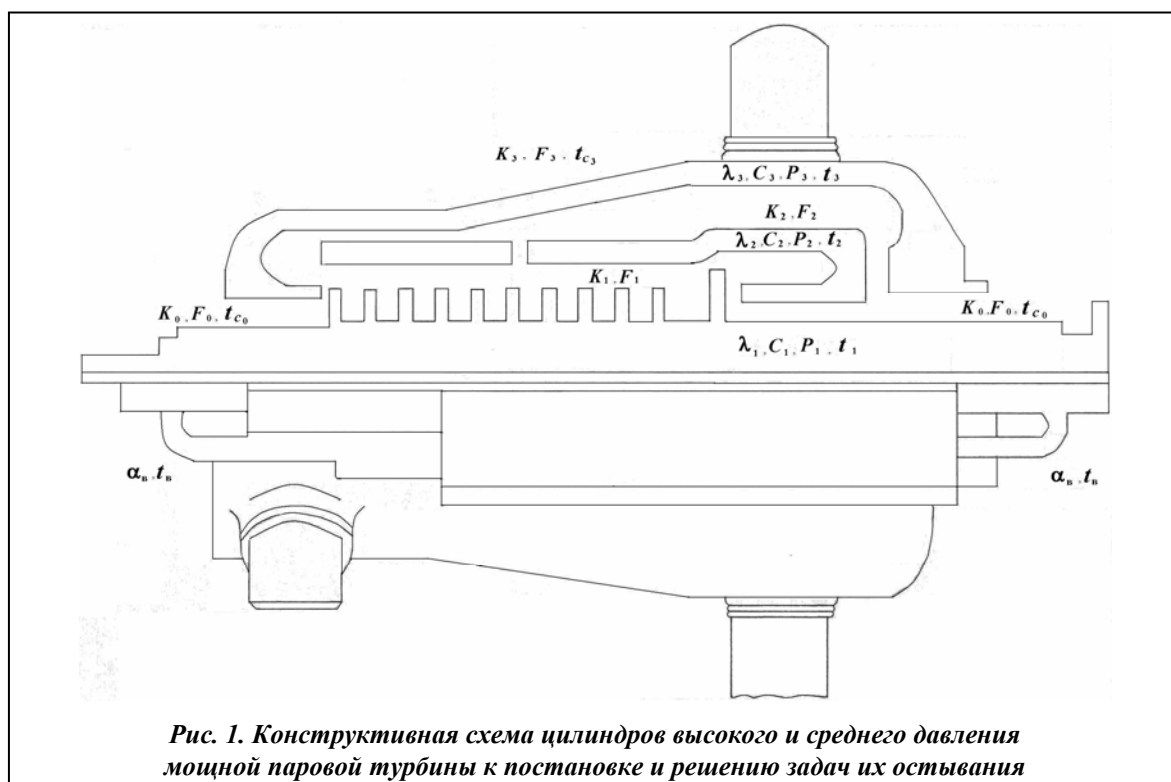


Рис. 1. Конструктивная схема цилиндров высокого и среднего давления мощной паровой турбины к постановке и решению задач их остывания

Для решения поставленных задач был использован метод элементарных тепловых балансов [1]. При этом для каждого элемента системы тел уравнение теплового баланса в общем случае имеет вид

$$Q_c = \sum_{i=1}^m Q_{k_i} + \sum_{i=1}^n Q_{\lambda_i} ,$$

где Q_c – поток тепла, выделяемый или поглощаемый теплоемкостью элемента за некоторый промежуток времени; Q_{k_i} – тепловой поток, обусловленный конвективным и лучистым теплообменом; Q_{λ_i} – тепловой поток, поступающий к элементу путем теплопроводности от n соседних элементов.

Поставленная трехмерная задача остывания цилиндра решается разделением на три одномерных – в радиальном, окружном и осевом направлениях. При этом в радиальном направлении тепловое взаимодействие между телами обусловлено только конвективным и лучистым теплообменом, в окружном – между элементами в пределах каждого из тел – только теплопроводностью; в осевом же направлении тепловое взаимодействие между элементами в каждом из тел определяется теплопроводностью и конвективным теплообменом на концевых участках внешнего корпуса и ротора (в опорных лапах цилиндров, в подшипниках ротора и др.).

В каждый из рассматриваемых моментов времени тепловое состояние, полученное решением радиальных балансовых уравнений, является начальным условием при решении окружных балансовых уравнений, в свою очередь, результат решения последних является начальным условием при решении осевых балансовых уравнений. Так производится сращивание трех одномерных решений в окончательное трехмерное решение задачи остывания цилиндра.

Аналитические решения задач остывания цилиндров высокого и среднего давления мощных паровых турбин

В соответствии с вышеизложенным начнем исследование процесса остывания цилиндра с решения системы уравнений, полученной балансом тепла в радиальном направлении.

Двумя параллельными сечениями, перпендикулярными оси ротора, и двумя меридиональными сечениями (рис. 2) выделяем элементарный секторный отсек цилиндра с весами (массами) G_1 , G_2 и G_3 элементов ротора, внутреннего и внешнего корпусов; соответственно их изменяющиеся во времени температуры обозначены через t_1 , t_2 и t_3 .

Полагаем, что нестационарное тепловое взаимодействие в данной системе описывается тремя линейными дифференциальными уравнениями первой степени

$$\left. \begin{aligned} c_1 G_1 dt_1 &= [K_0 F_0 (t_{c_0} - t_1) - K_1 F_1 (t_1 - t_2)] dt, \\ c_2 G_2 dt_2 &= [K_1 F_1 (t_1 - t_2) - K_2 F_2 (t_2 - t_3)] dt, \\ c_3 G_3 dt_3 &= [K_2 F_2 (t_2 - t_3) - K_3 F_3 (t_3 - t_{c_3})] dt \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

или после некоторых преобразований

$$\left. \begin{aligned} \frac{dt_1}{d\tau} + \frac{A_1 + K_1 F_1}{B_1} t_1 - \frac{K_1 F_1}{B_1} t_2 &= \frac{A_2}{B_1}, \\ \frac{dt_2}{d\tau} + \frac{K_1 F_1 + K_2 F_2}{B_2} t_2 - \frac{K_2 F_2}{B_2} t_3 - \frac{K_1 F_1}{B_2} t_1 &= 0, \\ \frac{dt_3}{d\tau} + \frac{K_2 F_2 + A_3}{B_3} t_3 - \frac{K_2 F_2}{B_3} t_2 &= \frac{A_4}{B_3}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где τ – время; $A_1 = K_0 F_0$, $A_2 = K_0 F_0 t_{c_0}$, $A_3 = K_3 F_3$, $A_4 = K_3 F_3 t_{c_3}$; $B_1 = c_1 G_1$, $B_2 = c_2 G_2$, $B_3 = c_3 G_3$; K_i ($i = 0, 1, 2, 3$) – коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи, определяемые лучистым теплообменом, естественной и вынужденной конвекцией; F_i ($i = 0, 1, 2, 3$) – площади поверхностей теплообмена и теплопередачи в рассматриваемой системе тел; c_i и G_i ($i = 0, 1, 2, 3$) – удельные теплоемкости и веса рассматриваемых элементов тел; t_{c_0} , t_{c_3} – температуры сред, омывающих рассматриваемые участки ротора и наружного корпуса.

Для решения системы (2) воспользуемся одним из методов операционного исчисления – интегральным преобразованием Лапласа [2]. При этом производная от температуры по времени в изображениях сводится к виду

$$L\left(\frac{dt}{d\tau}\right) = s \cdot T(s) - t_0,$$

где s – параметр интегрального преобразования Лапласа; $T = T(s)$ – изображение температуры элемента тела; t_0 – его начальная температура.

После некоторых преобразований система (2) в изображениях сводится к системе алгебраических уравнений

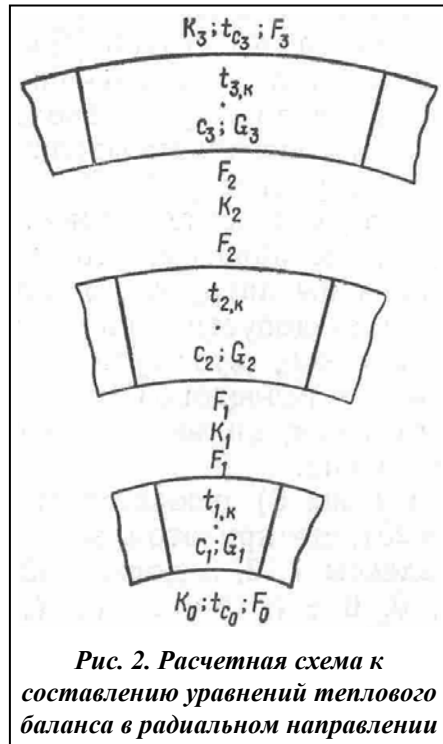


Рис. 2. Расчетная схема к составлению уравнений теплового баланса в радиальном направлении

$$\begin{cases} \left(s + \frac{A_1 + K_1 F_1}{B_1}\right) T_1 - \frac{K_1 F_1}{B_1} T_2 = t_{0_1} + \frac{A_2}{B_1} \cdot \frac{1}{s}, \\ -\frac{K_1 F_1}{B_2} T_1 + \left(s + \frac{K_1 F_1 + K_2 F_2}{B_2}\right) T_2 - \frac{K_2 F_2}{B_2} T_3 = t_{0_2}, \\ -\frac{K_2 F_2}{B_3} T_2 + \left(s + \frac{K_2 F_2 + A_3}{B_3}\right) T_3 = t_{0_3} + \frac{A_4}{B_3} \cdot \frac{1}{s}. \end{cases} \quad (3)$$

Представим систему (3) в каноническом виде

$$\begin{cases} a_{11} T_1 + a_{12} T_2 + 0 \cdot T_3 = b_1, \\ a_{12} T_1 + a_{22} T_2 + a_{23} T_3 = b_2, \\ 0 \cdot T_1 + a_{32} T_2 + a_{33} T_3 = b_3. \end{cases} \quad (4)$$

Решая систему (4), получим

$$T_1 = \frac{D_1}{D}, \quad T_2 = \frac{D_2}{D}, \quad T_3 = \frac{D_3}{D},$$

где $D_{1,2,3}$ – частные определители; D – общий определитель системы уравнений (4).

Для системы (4) общий определитель выражается закономерностью

$$D = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = a_{11} \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} - a_{12} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{23} \\ 0 & a_{33} \end{vmatrix},$$

$$D = a_{11}(a_{22} a_{33} - a_{23} a_{32}) - a_{12} a_{21} a_{33}.$$

Подставляя действительные значения коэффициентов, получим

$$D = D(s) = \left(s + \frac{A_1 + K_1 F_1}{B_1}\right) \left[\left(s + \frac{K_1 F_1 + K_2 F_2}{B_2}\right) \left(s + \frac{K_2 F_2 + A_3}{B_3}\right) - \frac{(K_2 F_2)^2}{B_2 B_3} \right] - \frac{(K_1 F_1)^2}{B_1 B_2} \left(s + \frac{K_2 F_2 + A_3}{B_3}\right), \quad (5)$$

$$D_1 = \begin{vmatrix} b_1 & a_{12} & 0 \\ b_2 & a_{22} & a_{23} \\ b_3 & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = b_1 \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} - a_{12} \begin{vmatrix} b_2 & a_{23} \\ b_3 & a_{33} \end{vmatrix}.$$

Аналогично находятся остальные частные определители.

Таким образом, в обобщенном виде имеем

$$T_i(s) = \frac{D_i(s)}{D(s)} = \frac{\Phi_i(s)}{\Psi(s)} \quad (i = 1, 2, 3),$$

где $\Phi_i(s) = s \cdot D_i(s)$, $\Psi(s) = s \cdot D(s)$ – полиномы с целыми степенями параметра интегрального преобразования Лапласа « s », в данном случае $\Phi_i(s)$ – полиномы 3-й степени, а $\Psi(s)$ – четвертой.

Переход от изображения к оригиналу дает [2]

$$t_i(\tau) = \frac{\Phi_i(0)}{\Psi'(0)} + \sum_{n=1}^3 \frac{\Phi_i(s_n)}{\Psi'(s_n)} \exp(s_n \tau), \quad (6)$$

где $\Psi'(s_n) = \frac{d}{ds} \Psi(s) \Big|_{s=s_n}$; $\frac{\Phi_i(0)}{\Psi'(0)} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\Phi_i(s)}{\Psi'(s)}$; s_n – корни уравнения

$$D(s) = 0, \quad (7)$$

все три корня которого должны быть только отрицательными.

Следует отметить, что кубическое уравнение (7) имеет точное решение, три корня которого определяются по методике, изложенной в справочнике [3]. Для этого уравнение предварительно приводится к виду, используемому в справочнике.

Оно может быть решено и приближенно с использованием стандартных программ (например, методом хорд или касательных), с контролем по точным решениям.

При разбивке цилиндра на произвольное количество элементов $M = M_1 \cdot M_2$, где M_1 и M_2 – количество элементов соответственно в окружном и осевом направлениях, закономерности (6) используются M раз для определения изменения температур, отражающего баланс тепла в радиальном направлении. При этом внутренние приведенные коэффициенты теплопередачи, используемые в расчетах, должны определяться с учетом термического сопротивления всех промежуточных газовых и металлических слоев цилиндра.

При задании коэффициента K_3 учитывается термическое сопротивление изоляции, то есть теплообмен приводится к внешней поверхности наружного корпуса [4, 5]. Кроме того, на поверхностях элементов наружного корпуса в местах расположения патрубков трубопроводов идет усиленный отвод тепла от патрубков к трубопроводам, остывающих значительно быстрее цилиндров. Здесь приведенный коэффициент теплоотдачи определяется по формуле

$$K_{\text{пр}} = \frac{\pi(d_2^2 - d_1^2)}{4F_{\text{пр}}} \sqrt{\frac{\lambda_m}{d_2 - d_1} \frac{1}{d_2} \left(\frac{1}{d_{\text{из}} \alpha_b} + \frac{1}{2\lambda_{\text{из}}} \ln \frac{d_{\text{из}}}{d_2} \right)^{-1}}, \quad (8)$$

которая получена путем последовательного приведения теплообмена: к внешней поверхности металлической стенки трубопровода, к торцевой поверхности патрубка в месте соединения его с трубопроводом, к суммарной поверхности элементов наружного корпуса $F_{\text{пр}}$, охватываемых рассматриваемым патрубком. В данном случае d_1 и d_2 – соответственно внутренний и внешний диаметры трубопровода; $d_{\text{из}} = d_2 + 2\delta_{\text{из}}$; $\delta_{\text{из}}$ – толщина изоляции; λ_m и $\lambda_{\text{из}}$ – коэффициенты теплопроводности материалов трубопровода и изоляции; α_b – коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности изоляции трубы, т. е. коэффициент теплоотдачи в окружающую воздушную среду.

Было принято, что отверстие условно заполняется металлом патрубка таким образом, чтобы общая масса участков, где расположены патрубки, осталась неизменной. Такой подход позволяет допустить произвольное число и расположение патрубков, что существенно расширяет возможности модели для исследования процессов остывания практически всех типов цилиндров турбин высокого, среднего и низкого давления.

При выдерживании баланса тепла в окружном и осевом направлениях, где теплота распространяется преимущественно теплопроводностью, также решается система уравнений типа (1) или (2). Но количество уравнений может быть значительно больше трех (до 10–12 и более). Здесь величины $K_{\theta-1}$ и K_{θ} , K_{j-1} и K_j определяются по формулам

$$K_{\theta-1} = \frac{2\lambda_{\theta}}{l_{\theta-1} + l_{\theta}}, \quad K_{\theta} = \frac{2\lambda_{\theta}}{l_{\theta} + l_{\theta+1}}, \quad (9)$$

$$K_{j-1} = \frac{2\lambda_j}{l_{j-1} + l_j}, \quad K_j = \frac{2\lambda_j}{l_j + l_{j+1}}, \quad (10)$$

где λ_{θ} и λ_j – коэффициенты теплопроводности материалов рассматриваемых элементов; $l_{\theta-1}$, l_{θ} , $l_{\theta+1}$, l_{j-1} , l_j , l_{j+1} – протяженности смежных элементов тел в окружном и осевом направлениях; $\theta = 2, 3, 4, \dots, M_1 - 1$; $j = 2, 3, 4, \dots, M_2 - 1$.

При выдерживании баланса тепла в окружном направлении система из M_1 уравнений решается M_2 раз. При выдерживании баланса тепла в осевом направлении система из M_2 уравнений решается M_1 раз.

Отвод тепла с концевых частей роторов (в подшипниках, с открытых участков и др.) и внешнего корпуса (с открытых опорных лап в окружающую среду) целесообразно учесть при выдерживании баланса тепла в осевом направлении.

Последовательность решения систем балансовых уравнений: сначала решается радиальная, затем окружная и, наконец, осевая системы. Тепловое состояние, полученное решением рассматриваемой системы, является начальным условием при решении последующей системы уравнений и т. д.

Поскольку теплофизические характеристики материалов (λ , c и др.) зависят от температуры, все системы уравнений в принципе являются нелинейными. Однако их можно линеаризовать, если для текущего момента времени определить эти характеристики по температурам, найденным в предыдущий момент времени.

Рассмотрим в качестве наглядного примера решение системы уравнений, составленной на основе баланса тепла в осевом направлении. Избегая громоздких выкладок при получении системы исходных дифференциальных уравнений, записываем в каноническом виде эту систему в изображениях, полученных операционным методом с использованием интегрального преобразования Лапласа [2].

Отсюда в обобщенном виде через общий и частные определители системы получаем изображения температур

$$T_{i,\theta,j} = \frac{D_{i,\theta,j}(s)}{D(s)} = \frac{\Phi_{i,\theta,j}(s)}{\Psi(s)} \quad (i=1,2,3; \quad \theta=1,2,3,\dots,N_1; \quad j=1,2,3,\dots,N_2),$$

где $\Phi_{i,\theta,j}(s) = s \cdot D_{i,\theta,j}(s)$; $\Psi(s) = s \cdot D(s)$ – полиномы с целыми степенями параметра интегрального преобразования Лапласа « s », причем $\Phi_{i,\theta,j}$ – полиномы N_2 -й степени, а $\Psi(s)$ – полиномы $(N_2 + 1)$ -й степени.

Переход от изображения к оригиналу дает [2]

$$t_{i,\theta,j}(\tau) = \frac{\Phi_{i,\theta,j}(0)}{\Psi'(0)} + \sum_{n=1}^{N_2} \frac{\Phi_{i,\theta,j}(s_n)}{\Psi'(s_n)} \exp(s_n \tau), \quad (11)$$

где $\Psi'(s_n) = \left. \frac{d}{ds} \Psi(s) \right|_{s=s_n}$; $\frac{\Phi_{i,\theta,j}(0)}{\Psi'(0)} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\Phi_{i,\theta,j}(s)}{\Psi'(s)}$; s_n – корни уравнения $D(s) = 0$, все N_2 корней которого должны быть только отрицательными.

Это уравнение уже не имеет точного решения при количестве тел больше трех. Корни его определяются численными методами с наперед заданной точностью с помощью стандартных подпрограмм, реализующих, например, методы хорд, касательных или их комбинации. При таком подходе и в радиальном направлении можно взять не три, а большее количество тел.

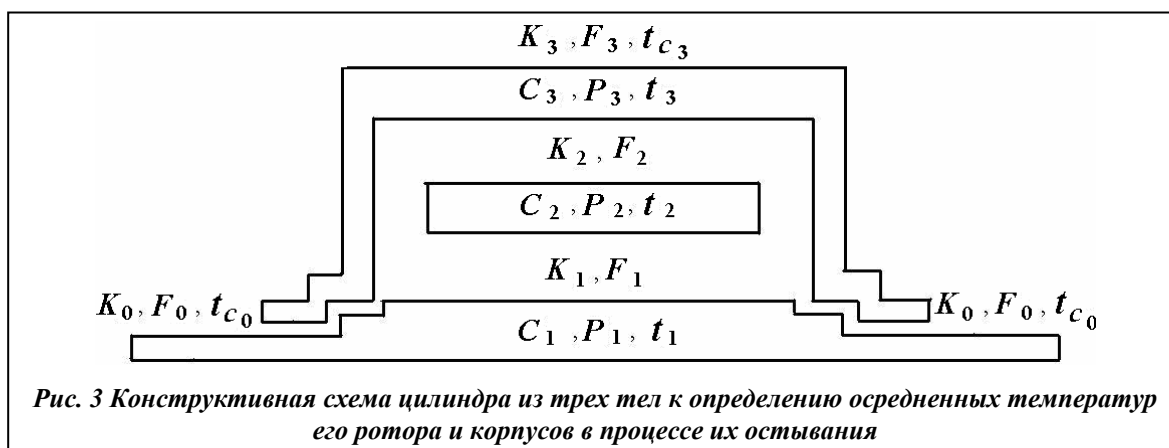
Оценка интенсивности процесса остывания цилиндра турбины

Здесь предложено решение упрощенной задачи остывания цилиндра турбоагрегата, где рассматривается совместное тепловое взаимодействие трех тел (ротор, внутренний и внешний корпуса) путем естественной и вынужденной конвекции и лучистого теплообмена (рис. 3). Массы P_i тел и площади основных теплопередающих (и тепловоспринимающих) поверхностей принимались равными исходным, взятыми из чертежей рассматриваемых деталей. Принято, что в пределах каждого из тел температуры мгновенно выравниваются, а теплофизические характеристики являются постоянными.

Тепловое состояние трех тел описывается решением (6), но

$$A_1 = \sum_{i=1}^n K_{0_i} F_{0_i}, \quad A_2 = \sum_{i=1}^n K_{0_i} F_{0_i} t_{C0_i},$$

$$A_3 = \sum_{i=1}^m K_{3_i} F_{3_i}, \quad A_4 = \sum_{i=1}^m K_{3_i} F_{3_i} t_{C3_i}, \quad G_i = P_i \quad (i=1,2,3),$$



где t_{c0_i} и t_{c3_i} – температуры сред, омывающих различные участки ротора в количестве n , и наружного корпуса в количестве m ; K_{0_i} и K_{3_i} – соответствующие коэффициенты теплоотдачи.

В этом алгоритме предусмотрено поэтапное уточнение теплофизических характеристик исследуемых тел.

Проведены численные исследования остывания цилиндра высокого давления турбины К-300-240 в течение семи суток при следующих предположениях: турбина остывает после длительной работы на номинальном режиме, в качестве начальных температур приняты осредненные температуры корпусов и ротора, достигнутые на номинальном режиме, вакуум в турбине сорван и отсутствует перетечка пара через концевые уплотнения, ротор турбины вращается валоповоротным устройством с частотой вращения 3–4 об/мин, в подшипники подается масло, температура которого 60 °С. Усредненная начальная температура наружного корпуса получилась равной 400 °С, внутреннего 450 °С, ротора 420 °С. Граничные условия теплообмена на поверхностях элементов цилиндра определялись (с учетом изменения температур тел) в соответствии с рекомендациями [6]. На интенсивность остывания цилиндра существенно влияют опорные лапы, не имеющие, как правило, изоляции. Коэффициент теплоотдачи согласно [6] принимался равным 30 Вт/(м²·°С). Осредненная величина приведенного коэффициента теплоотдачи от наружной поверхности внешнего корпуса к окружающей среде (с учетом теплового сопротивления изоляции, процессов естественной конвекции и лучистого теплообмена) получилась равной 0,6 Вт/(м²·°С) при температуре окружающей среды 20 °С.

Основное значение в отводе тепла от ротора имеют участки, находящиеся в зоне подшипников. Здесь теплообмен определяется в основном вынужденной конвекцией. Коэффициент теплоотдачи в зоне подшипников принимался равным 125 Вт/(м²·°С) [6]. На поверхностях ротора, расположенных между корпусом подшипника и корпусом турбины, граничные условия определяются в основном естественной конвекцией. Температура окружающей среды машинного зала для этих участков принималась равной 40 °С [6], а коэффициент теплоотдачи определялся на каждом этапе расчета.

Коэффициенты теплоотдачи K_1 и K_2 между корпусами и ротором вычислялись с учетом совместного воздействия естественной конвекции и лучеиспускания в процессе решения задачи.

На рис. 4 представлены кривые изменения температур корпусов (2 и 3) и ротора (1) цилиндра в процессе остывания. В начале процесса наблюдается незначительное увеличение температуры наружного корпуса (кривая 3). Затем через 12 ч температуры внутреннего и наружного корпусов практически выравниваются. В конце седьмых суток разница между температурой корпусов и ротора не превышает 6 °С.

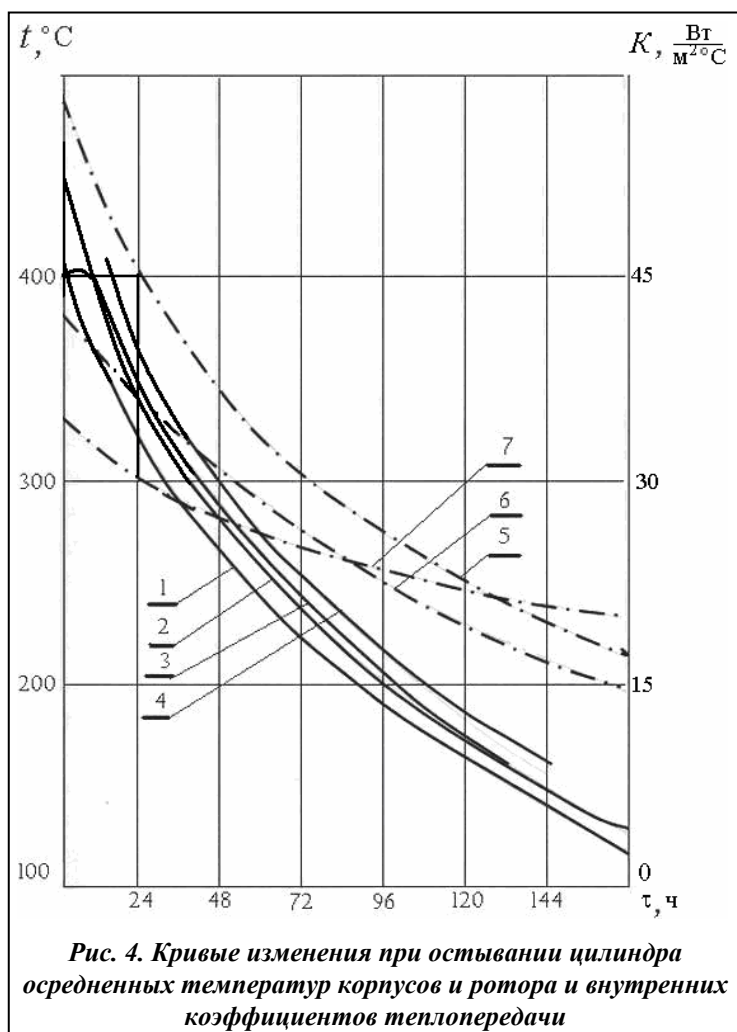


Рис. 4. Кривые изменения при остывании цилиндра осредненных температур корпусов и ротора и внутренних коэффициентов теплопередачи

ратурному состоянию внутреннего корпуса эту информацию можно использовать (при задании граничных условий третьего рода) для автономных детальных исследований остывания ротора и внешнего корпуса.

Кроме того, на рис. 4 приведены результаты натурных исследований остывания внешнего корпуса цилиндра высокого давления турбины К-300-240 (в зоне паровпуска), полученные на Трипольской ТЭС (кривая 4). Наблюдается хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных, подтвердившее правомерность упрощенной постановки задачи.

Задача совместного остывания трех тел была решена также конечно-разностным методом. Был использован неявный метод, позволяющий, как известно, выбирать произвольные значения временного шага.

Конечно-разностные уравнения системы (1) записывались по четырехточечной и шеститочечной схемам [1]. Предусматривалось пошаговое уточнение теплофизических характеристик, используемых в расчетах.

Исследованы решения при значениях временного шага 1; 2; 4; 8 ч. Наилучшее совпадение с аналитическим решением наблюдается при использовании шеститочечной схемы с переменным временным шагом (в течение первых 12 ч $\Delta\tau = 1$ ч; затем до 48 ч $\Delta\tau = 4$ ч; а далее $\Delta\tau = 8$ ч). В этом случае расхождение с аналитическим решением в течение всего процесса остывания не превышает 1°C .

Таким образом, полученное аналитическое решение дает возможность заранее выбрать временной шаг, обеспечивающий приемлемую точность конечно-разностного реше-

Скорость остывания всех деталей приблизительно одинакова, в конце рассматриваемого периода скорость остывания внутреннего корпуса несколько уменьшается (кривая 2). Численное значение темпа остывания в данном случае равно $0,007^\circ\text{C/ч}$ (первый корень уравнения (7)).

Значение темпа остывания цилиндра высокого давления (ЦВД) турбины К-200-130, полученное в результате натурных исследований, составляет в среднем $0,01^\circ\text{C/ч}$. Меньшее значение темпа остывания ЦВД в турбине К-300-240 обусловлено большими массами деталей цилиндра и, возможно, более качественной изоляцией наружной поверхности.

Наряду с температурными кривыми на рис. 4 представлены расчетные значения коэффициентов теплоотдачи от внутреннего корпуса к ротору K_1 (кривая 5) и внешнему корпусу K_2 (кривая 6), а также коэффициент теплоотдачи от ротора к окружающей среде (кривая 7). В сочетании с данными по темпера-

ния задачи остывания в более детальной постановке. Проведенные исследования показали, что приближенное решение задачи совместного остывания трех тел позволяет:

- оценить средние температуры ротора и корпусов в процессе остывания цилиндра мощной паровой турбины, которые можно использовать в качестве начальных при выборе рациональных пусковых режимов турбоагрегата после остановок различной продолжительности;
- оценить граничные условия теплообмена при детальных автономных исследованиях процессов остывания ротора и внешнего корпуса;
- использовать его в качестве эталонного при реализации на ПК моделей остывания турбины, более детально учитывающих геометрию объекта, граничные условия теплообмена и физику протекающих процессов (например, моделей, построенных на основе конечно-разностных методов).

В настоящее время задачи остывания цилиндров турбин решаются преимущественно конечно-разностными методами, представленными в [1, 4, 5]. В связи с вышеизложенным представляется целесообразным при их решении сочетать аналитические и конечно-разностные методы решения. Например, аналитически (5)–(11) решается система уравнений для трех тел, отражающая баланс тепла в радиальном направлении, а конечно-разностными методами (явными и неявными) – системы уравнений, отражающие баланс тепла в окружном и осевом направлениях. Во всех случаях аналитические решения могут быть использованы также в качестве эталонных, для выбора рациональных временных шагов, обеспечивающих необходимую устойчивость и точность решения задач конечно-разностными методами.

Выводы

Выявление закономерностей остывания паровых турбин и управление этими процессами в период остановок различной продолжительности является одним из эффективных путей повышения маневренности и надежности мощных энергоблоков ТЭС.

В этой связи усовершенствована объемная (трехмерная) математическая модель процесса остывания цилиндров турбин (ЦВД и ЦСД) с реализацией ее замкнутой системой аналитических зависимостей, полученных с учетом теплового взаимодействия всех тел, составляющих цилиндр (ротор, корпуса, обоймы, диафрагмы и т. п.).

Предложена объемная математическая модель в виде комбинации непрерывных аналитических и конечно-разностных закономерностей, где аналитические зависимости описывают баланс тепла в радиальном направлении, а конечно-разностные – в окружном и осевом направлениях.

Литература

1. *Переверзев Д. А.* Задачи теплового состояния базовых и маневренных турбоагрегатов / Д. А. Переверзев. – Киев: Наук. думка, 1980. – 216 с.
2. *Лыков А. В.* Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 599 с.
3. *Бронштейн И. Н.* Справочник по математике / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М.: Наука, 1967. – 608 с.
4. *Переверзев Д. А.* Моделирование и исследование процессов остывания мощных паротурбинных агрегатов / Д. А. Переверзев, В. А. Кострыкин, В. А. Палей // Теплоэнергетика. – 1980. – № 9. – С. 34–38.
5. *Переверзев Д. А.* Синтез рационального теплового состояния теплоэнергетического оборудования / Д. А. Переверзев. – Киев: Наук. думка, 1987. – 136 с.
6. *Приближенное* решение задачи совместного остывания статора и ротора мощной паровой турбины / Д. А. Переверзев, В. А. Кострыкин, В. А. Палей, Л. В. Поволоцкий // Пробл. машиностроения. – 1978. – Т. 9, № 1. – С. 69–73.

Поступила в редакцию
6.12.11