

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)

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТЫВАНИЯ КОРПУСОВ И РОТОРОВ ПРИ ОСТАНОВКАХ МОЩНЫХ ПАРОВЫХ ТУРБИН**

*Предложены двухмерные математические модели для автономного исследования процессов остывания роторов и корпусов, с достаточной полнотой учитывающие тепловое взаимодействие между ними в системе цилиндра турбины. Выполненные на моделях исследования показали, что, затормаживая процессы остывания в местах наибольших стоков тепла (опорные лапы цилиндров, патрубки трубопроводов и др.) улучшением изоляции, экранированием и управляемым электрообогревом, можно значительно сократить продолжительность последующих пусков турбин типа К-300-240 и К-500-240.*

*Запропоновані двовимірні математичні моделі для автономного дослідження процесів охолодження роторів і корпусів, що з достатньою повнотою враховують теплову взаємодію між ними в системі циліндра турбіни. Виконані на моделях дослідження показали, що заторможуючи процеси остигання в місцях найбільших стоків тепла (опорні лапи циліндрів, патрубки трубопроводів та ін) поліпшенням ізоляції, екрануванням і керуванням електрообігріванням, можна значно скоротити тривалість наступних пусків турбін типу К-300-240 і К-500-240.*

### **Введение**

Данная статья является продолжением работы [1], в которой разработаны варианты объемной (трехмерной) математической модели с аналитическими, конечно-разностными и комбинированными аналитическо-разностными методами решения задач остывания цилиндров (отсеков) мощных паровых турбин в период их остановок различной продолжительности. Далее излагаются созданные на их основе двухмерные математические модели для автономного исследования процессов остывания корпусов и роторов при остановках турбин.

### **Методы решения задач при обоснованных автономных исследованиях процессов остывания ротора, внутреннего и внешнего корпусов цилиндра**

Расчленение цилиндра на отдельные составляющие его тела для решения задач их остывания должно производиться с учетом теплового взаимодействия этих тел. С наибольшей полнотой такое взаимодействие можно отразить через приведенные коэффициенты теплопередачи, учитывающие термические сопротивления всех металлических и газовых слоев, расположенных между исследуемыми телами.

В конечном итоге цилиндры остывают до температуры воздуха в машзале электростанций и частично – до температуры воздуха в подвале машзала, где расположены конденсаторы турбин. Эти температуры и соответствующие им коэффициенты теплопередачи (теплоотдачи) и являются преимущественно граничными условиями при автономном исследовании процессов остывания основных тел цилиндра.

Исследования необходимо начинать с определения нестационарного теплового состояния ротора. Здесь коэффициенты теплопередачи приводятся к поверхностям обода дисков и к различным участкам поверхности вала ротора.

При приведении к поверхности обода дисков целесообразно учитывать 5 слоев: газовый слой над ободом, толщину стенки внутреннего корпуса, газовый слой межкорпусного пространства, толщину стенки наружного (внешнего) корпуса, толщину его изоляции. Приведенный коэффициент теплопередачи определяется по формуле

$$K_{0,j} = \left( \frac{1}{\alpha_B} \cdot \frac{R_0}{R_{из}} + \sum_{i=1}^5 \frac{R_0}{\lambda_i} \ln \frac{R_{i+1}}{R_i} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где  $\alpha_B$  – коэффициент теплоотдачи (к. т. о.) воздуха, определяемый по осредненным параметрам воздуха в машзале и подвале;  $R_0$  – радиус обода диска;  $R_{из} = R_{н2} + \delta_{из}$ ,  $R_{н2}$  – наружный радиус внешнего корпуса;  $\delta_{из}$  – толщина изоляции;  $\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности материалов прослоек, для газовых прослоек – это эквивалентный коэффициент теплопроводности, учитывающий теплоперенос естественной конвекцией и лучистым теплообменом;  $R_{i+1}$  и  $R_i$  – внешний и внутренний радиусы прослойки;  $j = 1, 2, 3, \dots, m$ ,  $m$  – число дисков в роторе.

При приведении к поверхности вала ротора рекомендуется учитывать 7 слоев: газовый слой в диафрагменном уплотнении, радиальный размер диафрагмы, газовый слой между диафрагмой и внутренним корпусом, толщину стенки внутреннего корпуса, газовый слой межкорпусного пространства, толщину стенки наружного корпуса, толщину изоляции. В этом случае приведенный коэффициент теплоотдачи определяется по формуле

$$K_{0,j} = \left( \frac{1}{\alpha_B} \cdot \frac{R_B}{R_{из}} + \sum_{i=1}^7 \frac{R_B}{\lambda_i} \ln \frac{R_{i+1}}{R_i} \right)^{-1}, \quad (2)$$

где  $R_B$  – внешний радиус вала;  $j = 1, 2, 3, \dots, n$ ;  $n$  – количество рассматриваемых участков вала ротора.

Тепловой баланс для элемента ротора в радиальном направлении с использованием (1) и (2) описывается уравнением

$$c_1 G_{1,j} dt_{1,j} = K_{0,j} F_{0,j} (t_{c_3,j} - t_{1,j}) d\tau$$

или

$$c_1 G_{1,j} dt_{1,j} = -K_{0,j} F_{0,j} (t_{1,j} - t_{c_3,j}) d\tau. \quad (3)$$

Дальнейшие преобразования выражения (3) дают

$$\frac{dt_{1,j}}{t_{1,j} - t_{c_3,j}} = -\frac{K_{0,j} F_{0,j}}{c_1 G_{1,j}} d\tau,$$

$$\ln(t_{1,j} - t_{c_3,j}) = \ln C - \frac{K_{0,j} F_{0,j}}{c_1 G_{1,j}} \tau,$$

$$t_{1,j} - t_{c_3,j} = C \cdot e^{-m_j \tau},$$

где  $m_j = \frac{K_{0,j} F_{0,j}}{c_1 G_{1,j}}$  – локальный темп остывания ротора.

При  $\tau = 0$  имеем  $C = t_{01,j} - t_{c_3,j}$ , где  $t_{01,j}$  – начальная температура элемента.

Окончательно получаем

$$t_{1,j} - t_{c_3,j} = (t_{01,j} - t_{c_3,j}) \cdot e^{-m_j \tau}. \quad (4)$$

Далее, решая балансовые уравнения в осевом направлении, получаем окончательное распределение температур в роторе в рассматриваемый момент времени. Здесь при осевой прогонке учитывается отвод тепла в подшипниках, с открытых участков ротора и в концевых уплотнениях, куда подается пар при остывании с поддержанием вакуума в конденсато-

ре. Тепловое состояние, определяемое по (4), является начальным при решении системы уравнений, описывающей баланс тепла в осевом направлении.

Обозначим получившееся распределение температур по ротору через  $t_{c_0,j}$ ; оно будет граничным условием теплообмена на внутренней поверхности внешнего (наружного) корпуса при автономном исследовании процесса его остывания. В качестве коэффициентов теплоотдачи здесь выступают коэффициенты теплопередачи от ротора до внутренней поверхности наружного корпуса.

При передаче тепла от поверхности обода дисков до внутренней поверхности наружного корпуса коэффициенты теплопередачи определяются по формуле

$$K_{0,j} = \left( \sum_{i=1}^3 \frac{R_1}{\lambda_i} \ln \frac{R_{i+1}}{R_i} \right)^{-1}, \quad (5)$$

где учтены три слоя (газовый слой между ободом и внутренним корпусом, толщина стенки внутреннего корпуса, толщина газового слоя межкорпусного пространства);  $R_1$  – внутренний радиус цилиндрической оболочки внешнего корпуса.

При передаче тепла от поверхности вала ротора до противоположной внутренней поверхности внешнего корпуса коэффициент теплопередачи определяется по формуле

$$K_{0,j} = \left( \sum_{i=1}^5 \frac{R_1}{\lambda_i} \ln \frac{R_{i+1}}{R_i} \right)^{-1}, \quad (6)$$

где к трем вышеназванным слоям добавляются еще два: газовый слой в диафрагменном уплотнении; радиальный размер (разность внешнего и внутреннего радиусов) диафрагмы.

Коэффициент теплопередачи от наружной поверхности внешнего корпуса к воздуху машзала (и его подвала) определяется по формуле

$$K_{3,0,j} = \left( \frac{1}{\alpha_{0,j}} \cdot \frac{R_2}{R_{из}} + \frac{R_2}{\lambda_{из}} \ln \frac{R_{из}}{R_2} \right)^{-1}, \quad (7)$$

где  $\alpha_{0,j}$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности изоляции наружного корпуса к окружающему воздуху, переменный в окружном и осевом направлениях;  $R_2$  – внешний радиус цилиндрической оболочки внешнего корпуса;  $\lambda_{из}$  – коэффициент теплопроводности изоляции;  $R_{из} = R_2 + \delta_{из}$ .

Помимо прочего, здесь должны быть учтены приведенные коэффициенты теплопередачи (теплоотдачи) в зонах патрубков пароподводящих и паротводящих трубопроводов, определяемые по формуле (8) работы [1].

Тепловой баланс для элемента внешнего корпуса в радиальном направлении с использованием (5)–(7) описывается дифференциальным уравнением

$$c_3 G_{3,0,j} dt_{3,0,j} = [K_{0,j} F_{0,0,j} (t_{c_0,j} - t_{3,0,j}) - K_{3,0,j} F_{3,0,j} (t_{3,0,j} - t_{c,0,j})] d\tau,$$

или

$$\begin{aligned} c_3 G_{3,0,j} dt_{3,0,j} &= -[K_{0,j} F_{0,0,j} (t_{3,0,j} - t_{c_0,j}) + K_{3,0,j} F_{3,0,j} (t_{3,0,j} - t_{c,0,j})] d\tau = \\ &= -[(K_{0,j} F_{0,0,j} + K_{3,0,j} F_{3,0,j}) t_{3,0,j} - (K_{0,j} F_{0,0,j} t_{c_0,j} + K_{3,0,j} F_{3,0,j} t_{c,0,j})] d\tau. \end{aligned}$$

После преобразований было получено

$$dt_{3,0,j} = -m_{0,j} (t_{3,0,j} - \bar{t}_{c,0,j}) d\tau,$$

где  $m_{0,j} = \frac{K_{0,j} F_{0,0,j} + K_{3,0,j} F_{3,0,j}}{c_3 G_{3,0,j}}$ ;  $\bar{t}_{c,0,j} = \frac{K_{0,j} F_{0,0,j} t_{c_0,j} + K_{3,0,j} F_{3,0,j} t_{c,0,j}}{K_{0,j} F_{0,0,j} + K_{3,0,j} F_{3,0,j}}$ ;  $t_{c,0,j}$  – температура

воздуха, окружающего цилиндр, изменяющаяся в окружном и осевом направлениях;  $\bar{t}_{c,0,j}$  –

локально осредненная температура сред, воздействующих на оболочку внешнего корпуса;  $m_{0,j}$  – локальный темп остывания внешнего корпуса.

Далее было получено

$$\frac{dt_{3,0,j}}{t_{3,0,j} - \bar{t}_{c,0,j}} = -m_{0,j} d\tau.$$

Решая это уравнение, получим

$$\ln(t_{3,0,j} - \bar{t}_{c,0,j}) = \ln C - m_{0,j} \tau, \quad t_{3,0,j} - \bar{t}_{c,0,j} = C \cdot e^{-m_{0,j} \tau}.$$

При  $\tau = 0$   $C = t_{03,0,j} - \bar{t}_{c,0,j}$ , где  $t_{03,0,j}$  – начальная температура элемента внешнего корпуса.

Окончательно имеем решение

$$t_{3,0,j} = \bar{t}_{c,0,j} + (t_{03,0,j} - \bar{t}_{c,0,j}) \cdot e^{-m_{0,j} \tau}. \quad (8)$$

Далее, последовательно решая балансовые уравнения в окружном и осевом направлениях, получим окончательное распределение температур во внешнем корпусе в рассматриваемый момент времени. Здесь только в осевых балансовых уравнениях учитывается интенсивный конвективный съем тепла с открытых (обнаженных) опорных лап внешнего корпуса. Во всех остальных зонах балансовые уравнения обоих направлений решаются при условии, что теплота в элементах корпуса переносится только теплопроводностью.

Тепловое состояние, определенное по (8), является начальным состоянием при решении системы окружных балансовых уравнений. В свою очередь, определенные здесь температуры являются начальными при решении системы осевых балансовых уравнений.

В обоих случаях решаются (преимущественно конечно-разностными методами) системы уравнений типа (1) из [1], где постоянные индексы 1, 2, 3 заменяются переменными:  $\theta - 1, \theta, \theta + 1$  ( $\theta = 2, 3, 4, \dots, M_1 - 1$ ) или  $j - 1, j, j + 1$  ( $j = 2, 3, 4, \dots, M_2 - 1$ ). При этом коэффициенты теплопередачи от элемента к элементу определяются по формулам (9) и (10) работы [1].

Аналогично в автономной постановке можно исследовать и процесс остывания внутреннего корпуса (или любой другой промежуточной детали). Но для практических приложений вполне достаточно определять их температуры как средние между температурами ротора и внешнего (наружного) корпуса.

Изложенная объемная математическая модель остывания паровой турбины в прошлом частично была реализована с использованием неявных конечно-разностных методов решения поставленных задач [1]. С ее помощью выполнен большой объем исследований процессов остывания турбин сверхкритических параметров типа К-300-240 и К-500-240 и влажнопаровых турбин АЭС мощностью  $1 \cdot 10^6$  кВт и  $750 \cdot 10^3$  кВт типа К-1000-60/1500 и К-750-60/3000 [1, 2]. Исследования с использованием вышеизложенных закономерностей в целом подтвердили полученные здесь результаты.

Были выполнены методические расчеты по обоснованию возможности автономного исследования процессов остывания роторов и корпусов турбин при отсутствии теплообмена между ротором и корпусами в зоне ступеней проточной части. Выявлено, что при таком подходе автономные исследования процессов остывания корпусов и роторов не дают достоверных результатов. Поэтому было рекомендовано численные и аналоговые исследования процессов остывания турбин проводить преимущественно с учетом совместного теплового взаимодействия всех составляющих их деталей как на объемных моделях цилиндров в целом, так и на автономных двухмерных осесимметричных моделях основных составляющих их тел (роторов и корпусов).

### **О влиянии процессов остывания на показатели маневренности турбин ТЭС**

Учитывая перспективу широкого использования турбин ТЭС мощностью 300 и 500 тыс. киловатт типов К-300-240 и К-500-240 ПО ХТГЗ для покрытия полупиковых нагрузок мощных энергосистем, на вышеизложенных математических моделях был выполнен

большой объем исследований процессов остывания ЦВД и ЦСД этих турбин. Рассмотрены варианты остановки турбин со срывом вакуума и сохранением его в течение 8-24 ч путем подачи пара при температуре 165 или 330 °С (давление 0,12 МПа) в камеры концевых уплотнений цилиндров. Чтобы выявить возможности сокращения времени пуска и разработки средств рационального управления остыванием турбины, были проведены также исследования при полной изоляции опорных лап и отсутствии отвода тепла через патрубки трубопроводов.

В ряде случаев [1, 2] удалось провести сопоставление расчетных результатов с данными натурального эксперимента, показавшее их неплохое совпадение и подтвердившее достоверность информации, получаемой на математических моделях.

Усиление тепловой защиты цилиндра, направленное на снижение потерь тепла в зонах опорных лап и патрубков, приводит к существенному повышению температурного уровня деталей после остановок различной продолжительности. В табл. 1 представлена температура роторов в зоне паровпуска ЦВД К-300-240, ЦВД и ЦСД К-500-240 через 8; 24; 48 ч остывания в условиях рассмотренных режимов. Как и следовало ожидать, наибольший температурный уровень обеспечивается при полной изоляции опорных лап и отсутствии отвода тепла через патрубки трубопроводов; по сравнению с обычным режимом остывания (при открытых лапах и реальной изоляции патрубков) выигрыш в температурном уровне по ротору ЦСД через 8; 24; 48 ч соответственно составляет 14; 51; 92 °С. При неизолированных лапах и отсечке тепловых потоков в зонах патрубков этот выигрыш для тех же времен равен 10; 28; 43 °С.

**Таблица 1. Изменение при остывании температуры роторов ЦВД и ЦСД турбин К-300-240 и К-500-240 в зоне паровпуска**

Режим остывания	Время остывания, ч	Температура роторов, °С		
		ЦВД К-300-240	ЦВД К-500-240	ЦСД К-500-240
Со срывом вакуума при реальной изоляции	8	411	418	424
	24	359	366	363
	48	296	310	295
Со срывом вакуума при отсечении тепловых потоков через патрубки	8	416	423	434
	24	381	377	391
	48	325	327	338
Со срывом вакуума при полной изоляции лап и отсечении потоков через патрубки	8	420	425	438
	24	411	398	414
	48	386	376	387
Без срыва вакуума в течение 24 ч при подаче на уплотнения пара с $t_{п} = 330$ °С	8	401	416	422
	24	359	365	360
	48	298	313	291
Без срыва вакуума в течение 24 ч при подаче на уплотнения пара с $t_{п} = 165$ °С	8	381	409	414
	24	321	338	331
	48	275	284	264

Исследования термонапряженного состояния основных деталей цилиндров показали [2, 3], что критическими узлами, лимитирующими продолжительность прогрева-нагрузки турбин, нередко являются роторы, несущие большую силовую и температурную нагрузку и имеющие зоны значительных концентраторов напряжений. Поэтому эффективность усиления тепловой защиты цилиндров была оценена по тепловому состоянию роторов ЦВД и ЦСД, достигнутому в процессе остановок различной продолжительности.

Для оценки общей продолжительности пускового режима была использована закономерность [1, 2] рационального управления тепловым состоянием роторов, обеспечивающая предельно допустимый уровень термических напряжений на обогреваемой поверхности в течение всего периода прогрева-нагрузки. При исследованиях в качестве допустимых термических напряжений принимали значения  $\sigma_d = 1/6 \cdot \sigma_{0,2}$  и  $\sigma_d = 1/4 \cdot \sigma_{0,2}$ , т. е. коэффициенты концентрации напряжений принимали равными 6 и 4 ( $\sigma_{0,2}$  – условный предел текучести материала ротора).

Результаты расчета времени пусковых режимов представлены в табл. 2. В качестве критических узлов приняты сечения роторов ЦВД К-300-240 и ЦСД К-500-240 в зоне паровпуска перед диском 1-й ступени. Здесь верхние значения времен соответствуют  $\sigma_d = 1/6 \cdot \sigma_{0,2}$ , нижние  $\sigma_d = 1/4 \cdot \sigma_{0,2}$ . При  $\sigma_d = 1/6 \cdot \sigma_{0,2}$  и обычном режиме остывания (вакуум сорван, нанесена проектная изоляция) для пусков после остановок на 8; 24; 48 ч получены продолжительности пусковых режимов турбины К-500-240, составляющие соответственно 0,9; 1,66; 2,55 ч. При полной изоляции лап и отсечении тепловых потоков через патрубки эти времена сокращаются соответственно на 0,3; 0,86; 1,4 ч; при неизолированных лапах и отсутствии потока тепла через патрубки – на 0,2; 0,61; 0,82 ч. При этом предполагалось, что тепловое состояние трубопроводов, задвижек и клапанов доведено до необходимого уровня предварительным прогревом с отводом пара через дренажную или байпасную систему.

**Таблица 2. Расчётное время пуска паровых турбин К-300-240 и К-500-240 при характерных режимах остывания**

Режим остывания	Продолжительность остановки, ч	Время пускового режима, ч	
		К-300-240	К-500-240
Со срывом вакуума при реальной изоляции	8	0,83 0,37	0,90 0,33
	24	1,42 0,73	1,66 0,93
	48	2,17 1,25	2,55 1,50
Со срывом вакуума при отсечении тепловых потоков через патрубки	8	0,50 0,18	0,70 0,20
	24	1,00 0,52	1,05 0,47
	48	1,70 0,93	1,73 0,95
Со срывом вакуума при полной изоляции опорных лап и отсечении потоков через патрубки	8	0,47 0,14	0,60 0,17
	24	0,67 0,27	0,80 0,33
	48	1,10 0,51	1,15 0,55

При  $\sigma_d = 1/4 \cdot \sigma_{0,2}$  продолжительность рассмотренных пусковых режимов сокращается в 2–2,5 раза. Однако снижение коэффициентов концентрации напряжений требует существенного изменения геометрии в зоне передних уплотнений ротора (увеличение радиусов закруглений в термокомпенсационных канавках, выточках уплотнений, галтелях дисков и пр.), что на действующих установках выполнить не всегда возможно, но вполне реализуемо в модернизируемых.

Таким образом, проведенные исследования процессов остывания мощных паротурбинных агрегатов вскрыли резервы существенного повышения их маневренности за счет увеличения температурного уровня деталей перед пуском. На действующих турбоустанов-

как они могут быть реализованы в основном путем усиления тепловой защиты (улучшение качества изоляции, экранирование, электрообогрев наиболее остываемых зон) и организации рационального управления остыванием трубопроводов, задвижек, клапанов и собственно турбины. Управление остыванием этих узлов позволит обеспечить наилучшую предпусковую готовность турбоагрегатов и сократить продолжительность их пусков в 1,5-2,5 раза.

### Выводы

Предложены двухмерные математические модели для автономного исследования процессов остывания роторов и корпусов, с достаточной полнотой учитывающие тепловое взаимодействие между ними в системе цилиндра через приведенные коэффициенты теплопередачи, где отражено термическое сопротивление всех металлических и газовых слоев, расположенных между исследуемыми телами.

Выполненные на моделях исследования показали, что, затормаживая процессы остывания в местах наибольших стоков тепла (опорные лапы цилиндров, патрубки трубопроводов и др.) улучшением изоляции, экранированием и управляемым электрообогревом, можно существенно увеличить предпусковой температурный уровень деталей и сократить продолжительность пусков турбин типа К-300-240 и К-500-240 в 1,5–2,5 раза.

### Литература

1. *Переверзев Д. А.* Совершенствование объемных математических моделей остывания паровых турбин после остановок мощных энергоблоков тепловых электростанций / Д. А. Переверзев, Н. Ю. Бабак, Ж. А. Шелехина // Пробл. машиностроения. – 2012. – Т. 14, № 5. – С. 3–11.
2. *Переверзев Д. А.* Синтез рационального теплового состояния теплоэнергетического оборудования / Д. А. Переверзев. – Киев: Наук. думка, 1987. – 136 с.
3. *Переверзев Д. А.* Совершенствование маневренных характеристик модернизируемых паровых турбин типа К-300–240 методами управления их тепловым состоянием / Д. А. Переверзев, А. Г. Лебедев, Н. А. Борисов // Пробл. машиностроения. – 2006. – Т. 9, № 1. – С. 3–18.

Поступила в редакцию  
26.11.11

УДК 536.242

**В. К. Шаров**, канд. техн. наук

**Н. А. Сафонов**, канд. физ-мат. наук

**Б. И. Компаниец**

Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины  
(г. Харьков, e-mail: matsevit@ipmach.kharkov.ua)

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СУШКИ ПРОПИТАННЫХ ЛАКОМ ОБМОТОК ЭЛЕКТРОМАШИН

*Предложены конструктивные изменения вентиляционной системы сушильных печей и определены минимально необходимые объемы воздуха, обеспечивающие взрывобезопасный режим сушки пропитанных изоляционным лаком обмоток электромашин. При расчетах объемов воздуха учитывалось изменение интенсивности испарения растворителей в процессе сушки.*

*Запропоновані конструктивні зміни вентиляційної системи сушильних печей та визначені мінімально необхідні об'єми повітря, які забезпечують вибухобезпечний режим сушіння насичених ізоляційним лаком обмоток електромашин. Під час розрахунків об'ємів повітря враховувалась зміна інтенсивності випаровування розчинників в процесі сушіння.*