

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)

## **РАЗВИТИЕ МЕТОДА ПОСТРОЕНИЯ ФУНКЦИЙ РАЦИОНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ СОСТОЯНИЕМ МОЩНЫХ ПАРОТУРБИННЫХ АГРЕГАТОВ**

*Развит метод построения функций рационального управления тепловым состоянием мощных паротурбинных агрегатов тепловых электростанций (ТЭС), предлагающий формировать эти функции с доведением на каждом опорном промежуточном и номинальном режимах работы термических напряжений в наиболее нагруженных деталях до предельно допустимого уровня. Выявлены возможности существенного повышения маневренности мощных турбоагрегатов ТЭС типа К-300-240.*

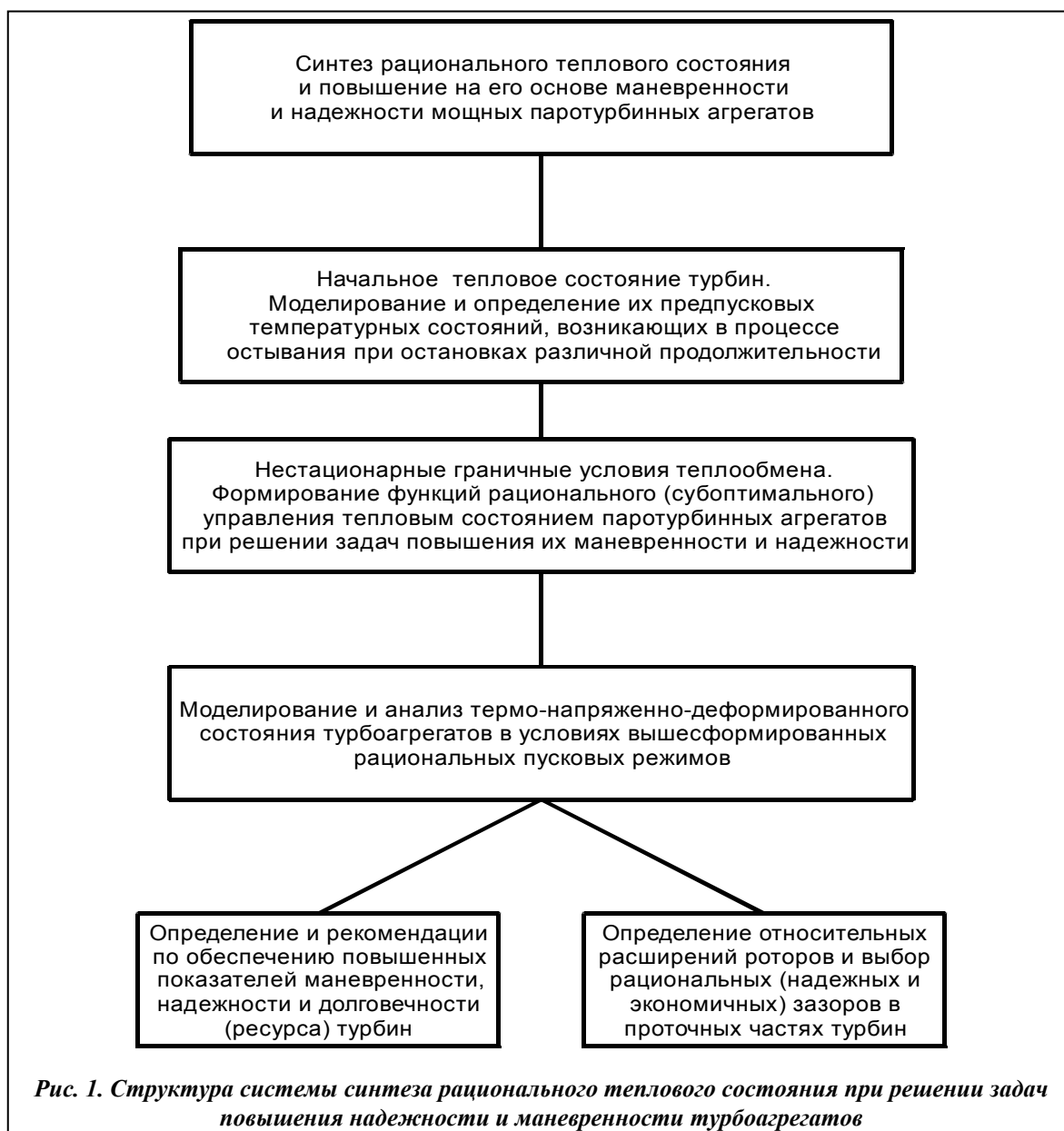
*Розвинуто метод побудови функцій раціонального керування тепловим станом потужних паротурбінних агрегатів теплових електростанцій (ТЕС), що пропонує формувати ці функції з доведенням на кожному опорному проміжному та номінальному режимах роботи термічних напружень в найбільш навантажених деталях до гранично допустимого рівня. Виявлено можливості істотного підвищення маневреності потужних турбоагрегатів ТЕС типу К-300-240.*

### **Введение**

Построение функций рационального управления тепловым состоянием турбин является центральным организующим и направляющим процессом при синтезе (формировании) их субоптимального теплового состояния и повышении на его основе надежности, маневренности и экономичности мощных паротурбинных агрегатов. Уровень термонапряженного состояния в наиболее нагруженных деталях выдерживается здесь на предельно допустимом безопасном уровне на всех переходных и установившихся режимах работы оборудования. При этом определяются краевые условия (начальные и граничные условия, а иногда и геометрия), обеспечивающие нестационарные и установившиеся температурные поля деталей с заданными характеристиками [1, 2].

Обобщенная структура системы синтеза рационального (субоптимального) теплового состояния паротурбинных агрегатов представлена на рис. 1. Функции управления тепловым состоянием формируются на основе аналитических закономерностей, полученных в работах [1, 2]. Первоначально определялась температурная составляющая функции управления по номинальным (максимальным) параметрам рабочей среды при максимальных значениях коэффициентов теплоотдачи (к.т.о.). При этом предельно допустимый максимальный уровень термонапряженного состояния детали достигался только в конце процесса прогрева-нагружения турбины. При меньших параметрах рабочей среды, изменяющихся в реальных условиях переходного процесса, показатели термонапряженного состояния, естественно, были ниже, в связи с чем появлялись некоторые резервы дальнейшего сокращения продолжительности пусковых режимов (процессов прогрева-нагружения) турбин.

В излагаемой работе предлагается формировать функции управления тепловым состоянием турбоагрегатов с использованием опорных режимных точек: 25–30, 30–60, 60–80, 80–100% от номинальной нагрузки, в которых выдерживается предельно допустимый уровень термонапряженного состояния наиболее нагруженных деталей и узлов. Ожидается, что



это приведет к дальнейшему сокращению продолжительности пусковых режимов паротурбинных агрегатов.

Основными узлами, лимитирующими продолжительность пусковых режимов паровых турбин, являются участки роторов высокого и среднего давления (РВД и РСД) в зонах поступления рабочей среды, т.е. участки первых ступеней, включая прилежащие к дискам начальные участки переднего и диафрагменного уплотнений. При этом наиболее термонапряженными оказались начальные участки переднего концевое уплотнения РСД в зоне термокомпенсационных канавок [3]. Поэтому в дальнейших исследованиях в качестве узла, лимитирующего продолжительность пусков мощных турбин ТЭС типа К-300-240, был использован начальный участок зоны (цилиндрический элемент) переднего концевое уплотнения РСД.

#### Основное содержание и результаты исследований

Из работ [1, 2] для случая постоянных термических напряжений  $\sigma$  на внешней поверхности лимитирующего цилиндрического элемента ( $r = R_2$ ), при произвольном началь-

ном распределении температур  $t(r, 0) = f(\rho)$  были получены следующие обоснованно усеченные аналитические решения:

$$t(\rho, Fo) = \frac{1}{R_C} \left\{ J - \Delta t \left[ \frac{1}{2}(\rho^2 - k^2) - k^2 \ln\left(\frac{\rho}{k}\right) + 2 \left( Fo - \frac{R_{C1}}{R_C} \right) \right] \right\}; \quad (1)$$

$$t_C(Fo) = \frac{1}{R_C} \left\{ J - \Delta t \left[ R_{C2} + 2 \left( Fo - \frac{R_{C1}}{R_C} \right) \right] \right\}, \quad (2)$$

где  $t(\rho, Fo)$  – температурное поле цилиндрической стенки, имитирующей элемент, который лимитирует продолжительность пусковых режимов;  $t_C(\rho, Fo)$  – температура среды, омывающей внешнюю поверхность лимитирующего элемента ( $r = R_2$ );

$$J = \int_k^1 f(\rho) \left[ (2-d) \ln\left(\frac{1}{\rho}\right) + \frac{d}{2}(1-\rho^2) \right] \rho d\rho; \quad \rho = \frac{r}{R_2}, \quad k = \frac{R_1}{R_2}, \quad (R_1 \leq r \leq R_2, \quad k \leq \rho \leq 1);$$

$$d = \frac{2}{1-k^2}; \quad Fo = \frac{a\tau}{R_2^2} - \text{критерий Фурье}; \quad \tau - \text{время}; \quad a = \frac{\lambda}{c\gamma} - \text{коэффициент температуропроводности материала}; \quad \lambda, c \text{ и } \gamma - \text{соответственно коэффициенты теплопроводности, теплоемкости и плотность материала цилиндрической стенки};$$

$$R_C = \frac{1-3k^2}{4} - \frac{k^4 \ln k}{1-k^2};$$

$$R_{C1} = \frac{1+k^2-8k^4}{48} + \frac{k^2(1-2k^2-k^4) \ln k}{8(1-k^2)} \quad R_{C2} = (1-k^2) \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{Bi} \right) + k^2 \ln k; \quad Bi = \frac{\alpha R_2}{\lambda} - \text{критерий Био}; \quad \alpha - \text{коэффициент теплоотдачи среды в опорной режимной точке};$$

$$\Delta t = \frac{\sigma(1-\nu)}{\alpha_n E} - \text{эффективная температурная разность, эквивалентная термическому напряжению } \sigma;$$

$\Delta t = \bar{t} - t(1, Fo)$ ,  $\bar{t}$  – среднеинтегральная температура стенки;  $t(1, Fo)$  – температура внешней поверхности стенки;  $\nu$  и  $\alpha_n$  – коэффициенты объемного и линейного теплового расширения материала стенки,  $E$  – модуль упругости материала;  $\sigma = \sigma_{0,2}/K_{кн}$ ,  $\sigma_{0,2}$  – предел текучести материала стенки;  $K_{кн}$  – коэффициент концентрации напряжений в термокомпенсационной канавке ротора или в любом другом месте резкой концентрации напряжений; иногда его понимают как коэффициент запаса по отношению к  $\sigma_{0,2}$ .

В качестве опорных режимных точек возьмем и исследуем следующие значения расходной нагрузки (%): 30, 60, 80 и 100. В интервале от 0 до 100 они могут иметь и другие значения. Величины  $\alpha$  и  $t_C$  в опорных точках известны – они определяются предварительно по данным расчетов турбины на переменные (частичные) режимы; в промежутках между опорными точками они определяются интерполяцией. Во всех режимных и промежуточных опорных точках величины  $t_C$  и  $\alpha$  могут быть также достоверно определены по зависимостям, приведенным в [3].

Время достижения значения температуры среды в опорной точке  $\tau_m$  вычисляется из уравнения

$$t_{C_m} = \frac{1}{R_C} \left\{ J - \Delta t \left[ R_{C2} + 2 \left( Fo_m - \frac{R_{C1}}{R_C} \right) \right] \right\}.$$

Отсюда, после некоторых преобразований, имеем

$$Fo_m = \frac{R_{C1}}{R_C} - \frac{1}{2} \left( R_{C2} + R_C \frac{t_{C_m} - t_0}{\Delta t} \right), \quad \tau_m = \frac{R_2^2}{a} Fo_m, \quad (3)$$

где  $t_{C_m}$  – величина температуры среды в опорной режимной точке.

Предлагаемые уравнения (1) и (2) получены из общего решения [2] при отбрасывании из него суммы бесконечного ряда, организованного по корням характеристического уравнения. Поэтому в принципе они применимы, начиная с некоторого значения  $Fo$ . Анализ показал, что таким ограничением может быть выражение  $Fo - \frac{R_{C1}}{R_C} \geq 0$  или  $Fo \geq \frac{R_{C1}}{R_C}$ , чтобы при  $r = R_1$  на первом этапе прогрева не получилась температура меньше  $t_0$ , начальной температуры цилиндрического элемента. Тем не менее, последующие вычисления производились и при меньших значениях  $Fo$ , причем результаты были монотонно устойчивыми. По-видимому, интеграл  $J$  сглаживает все возникающие в связи с этим погрешности, и результаты получаются более или менее достоверными.

Для сплошного цилиндра все вышерассмотренные зависимости существенно упрощаются. Путем предельного перехода при  $k \rightarrow 0$  из них было получено

$$d = 2, \quad R_C = \frac{1}{4}, \quad R_{C1} = \frac{1}{48}, \quad \frac{R_{C1}}{R_C} = \frac{1}{12}, \quad R_{C2} = \frac{1}{2} + \frac{1}{Bi}, \quad J = \int_k^1 f(\rho)(1-\rho^2)\rho d\rho$$

$$t(\rho, Fo) = 4 \left\{ J - \Delta t \left[ \frac{1}{2} \rho^2 + 2 \left( Fo - \frac{1}{12} \right) \right] \right\}, \quad (4)$$

$$t_C(Fo) = 4 \left\{ J - \Delta t \left[ R_{C2} + 2 \left( Fo - \frac{1}{12} \right) \right] \right\}, \quad (5)$$

$$Fo_m = \frac{1}{12} - \frac{1}{2} \left( R_{C2} + \frac{t_{Cm} - 4J}{4\Delta t} \right), \quad \tau_m = \frac{R_2^2}{a} Fo_m. \quad (6)$$

Если в течение процесса прогрева-нагружения выдерживается только напряжение, допустимое на номинальном режиме, то  $J = R_C t_0$ , и зависимости (4)–(6) принимают вид

$$t(\rho, Fo) = t_0 - 4\Delta t \left[ \frac{1}{2} \rho^2 + 2 \left( Fo - \frac{1}{12} \right) \right]; \quad (7)$$

$$t_C(Fo) = t_0 - 8\Delta t \left( \frac{1}{6} + \frac{1}{2Bi} + Fo \right) \quad (8)$$

$$Fo_m = - \left( \frac{1}{6} + \frac{1}{2Bi} + \frac{t_{Cm} - t_0}{8\Delta t} \right), \quad \tau_m = \frac{R_2^2}{a} Fo_m. \quad (9)$$

Эти зависимости должны давать несколько большее время прогрева-нагружения, чем для полого цилиндра. Их целесообразно использовать для предварительных оценок и контроля результатов, получаемых при расчетах по (1)–(3).

Далее последовательно рассмотрим вышенамеченные этапы прогрева-нагружения турбоагрегата ТЭС.

1. Этап прогрева-нагружения от 0 до 30% (опорная режимная точка 30%). Он начинается от выравненной температуры в лимитирующем узле, т.е.  $f_1(\rho) = t_0$ . Здесь после интегрирования  $J = J_1 = R_C t_0$ . Следует отметить, что, если вместо  $f(\rho)$  будет любая постоянная  $A$ , результат будет аналогичным:  $J = AR_C$ . Это будет использовано при рассмотрении следующих этапов прогрева-нагружения.

В результате для первого этапа имеем

$$Fo_{m1} = \frac{R_{C1}}{R_C} - \frac{1}{2} \left( R_{C2} + \frac{R_C t_{Cm1} - J_1}{\Delta t_1} \right), \quad \tau_{m1} = \frac{R_2^2}{a_1} Fo_{m1}.$$

Распределение температур в стенке (по толщине детали) в конце этапа (начальное распределение температур для 2-го этапа)

$$f_2(\rho) = t(\rho, Fo_{m_1}) = \frac{1}{R_C} \left\{ J_1 - \Delta t_1 \left[ \frac{1}{2} (\rho^2 - k^2) - k^2 \ln \left( \frac{\rho}{k} \right) + 2 \left( Fo_{m_1} - \frac{R_{C_1}}{R_C} \right) \right] \right\}.$$

При определении  $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$  и др.  $\sigma_{0,2}$  принималась в зависимости от температур  $t_{C_m}$  в конце каждого этапа, согласно табличным данным [3,4]; значения  $E$ ,  $\alpha_n$ ,  $\lambda$ ,  $a$  определялись по тем же таблицам по осредненной температуре стенки  $\bar{t} \approx t_{C_m} + \Delta t$ , т. е. принималось, что  $t(1, Fo_m) \approx t_{C_m}$ , т. к. коэффициенты теплоотдачи имеют здесь большие значения. Используется метод последовательных приближений; выполненные расчеты показали, что достаточно двух приближений.

2. Этап прогрева-нагружения от 30 до 60% (опорная режимная точка 60%).

$$f_2(\rho) = A_1 - \frac{\Delta t_1}{R_C} \left( \frac{1}{2} \rho^2 - k^2 \ln \rho \right),$$

где  $A_1 = \frac{1}{R_C} \left\{ J_1 - \Delta t_1 \left[ k^2 \ln k - \frac{1}{2} k^2 + 2 \left( Fo_{m_1} - \frac{R_{C_1}}{R_C} \right) \right] \right\}$ .

Используя это выражение, получаем

$$\begin{aligned} J_2 &= \int_k^1 f(\rho) \left[ (2-d) \ln \left( \frac{1}{\rho} \right) + \frac{d}{2} (1-\rho^2) \right] \rho d\rho = \\ &= A_1 R_C - \frac{\Delta t_1}{R_C} \int_k^1 \left( \frac{1}{2} \rho^2 - k^2 \ln \rho \right) \left[ \frac{d}{2} (1-\rho^2) - (2-d) \ln \rho \right] \rho d\rho = A_1 R_C - \frac{\Delta t_1}{R_C} \cdot B \end{aligned} \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} B &= \int_k^1 \left( \frac{1}{2} \rho^2 - k^2 \ln \rho \right) \left[ \frac{d}{2} (1-\rho^2) - (2-d) \ln \rho \right] \rho d\rho = \frac{d}{4} \left( \frac{1-k^4}{4} - \frac{1-k^6}{6} \right) + \\ &+ \frac{1}{2} (2-d) \left( \frac{k^4}{4} \ln k + \frac{1-k^4}{16} \right) + \frac{k^2 d}{2} \left[ \left( \frac{k^2}{2} - \frac{k^4}{4} \right) \ln k + \frac{1-k^2}{4} - \frac{1-k^4}{16} \right] + \\ &+ k^2 (2-d) \left[ \frac{k^2}{2} \ln k - \frac{k^2}{2} (\ln k)^2 + \frac{1-k^2}{4} \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

Система уравнений на 2-м этапе прогрева

$$\begin{aligned} t(\rho, Fo) &= \frac{1}{R_C} \left\{ J_2 - \Delta t_2 \left[ \frac{1}{2} (\rho^2 - k^2) - k^2 \ln \left( \frac{\rho}{k} \right) + 2 \left( Fo - \frac{R_{C_1}}{R_C} \right) \right] \right\}, \\ t_C(Fo) &= \frac{1}{R_C} \left\{ J_2 - \Delta t_2 \left[ R_{C_2} + 2 \left( Fo - \frac{R_{C_1}}{R_C} \right) \right] \right\}. \end{aligned}$$

Продолжительность 2-го этапа прогрева-нагружения

$$Fo_{m_2} = \frac{R_{C_1}}{R_C} - \frac{1}{2} \left( R_{C_2} + \frac{R_C t_{C_{m_2}} - J_2}{\Delta t_2} \right), \quad \tau_{m_2} = \frac{R_2^2}{a_2} Fo_{m_2}. \quad (12)$$

Температурное поле в конце 2-го и начале 3-го этапа прогрева-нагружения

$$f_3(\rho) = t(\rho, Fo_{m_2}) = A_2 - \frac{\Delta t_2}{R_C} \left( \frac{1}{2} \rho^2 - k^2 \ln \rho \right), \quad (13)$$

где  $A_2 = \frac{1}{R_C} \left\{ J_2 - \Delta t_2 \left[ k^2 \ln k - \frac{1}{2} k^2 + 2 \left( Fo_{m_2} - \frac{R_{C_1}}{R_C} \right) \right] \right\}$ .

3. Этап прогрева-нагружения от 60 до 80% (опорная режимная точка 80%). Используя вышеизложенные преобразования, получим

$$J_3 = A_2 R_C - \frac{\Delta t_2}{R_C} B. \quad (14)$$

Система уравнений, описывающих 3-й этап прогрева-нагружения

$$t(\rho, Fo) = \frac{1}{R_C} \left\{ J_3 - \Delta t_3 \left[ \frac{1}{2} (\rho^2 - k^2) - k^2 \ln \left( \frac{\rho}{k} \right) + 2 \left( Fo - \frac{R_{C_1}}{R_C} \right) \right] \right\},$$

$$t_C(Fo) = \frac{1}{R_C} \left\{ J_3 - \Delta t_3 \left[ R_{C_2} + 2 \left( Fo - \frac{R_{C_1}}{R_C} \right) \right] \right\}.$$

Продолжительность 3-го этапа прогрева-нагружения

$$Fo_{m_3} = \frac{R_{C_1}}{R_C} - \frac{1}{2} \left( R_{C_2} + \frac{R_C t_{C_{m_3}} - J_3}{\Delta t_3} \right), \quad \tau_{m_3} = \frac{R_2^2}{a_3} Fo_{m_3}. \quad (15)$$

Температурное поле цилиндрической стенки в конце 3-го и начале 4-го этапов прогрева-нагружения

$$f_4(\rho) = t(\rho, Fo_{m_3}) = A_3 - \frac{\Delta t_3}{R_C} \left( \frac{1}{2} \rho^2 - k^2 \ln \rho \right), \quad (16)$$

где  $A_3 = \frac{1}{R_C} \left\{ J_3 - \Delta t_3 \left[ k^2 \ln k - \frac{1}{2} k^2 + 2 \left( Fo_{m_3} - \frac{R_{C_1}}{R_C} \right) \right] \right\}$ .

4. Этап прогрева-нагружения от 80 до 100% (опорная режимная точка 100%). Согласно вышеизложенному алгоритму

$$J_4 = A_3 R_C - \frac{\Delta t_3}{R_C} B. \quad (17)$$

Система уравнений, описывающих 4-й этап прогрева-нагружения

$$t(\rho, Fo) = \frac{1}{R_C} \left\{ J_4 - \Delta t_4 \left[ \frac{1}{2} (\rho^2 - k^2) - k^2 \ln \left( \frac{\rho}{k} \right) + 2 \left( Fo - \frac{R_{C_1}}{R_C} \right) \right] \right\}, \quad (18)$$

$$t_C(Fo) = \frac{1}{R_C} \left\{ J_4 - \Delta t_4 \left[ R_{C_2} + 2 \left( Fo - \frac{R_{C_1}}{R_C} \right) \right] \right\}.$$

Продолжительность 4-го этапа прогрева-нагружения

$$Fo_{m_4} = \frac{R_{C_1}}{R_C} - \frac{1}{2} \left( R_{C_2} + \frac{R_C t_{C_{m_4}} - J_4}{\Delta t_4} \right), \quad \tau_{m_4} = \frac{R_2^2}{a_4} Fo_{m_4}. \quad (19)$$

Общая продолжительность режима прогрева-нагружения турбины (ч)

$$\tau_m = \tau_{m_1} + \tau_{m_2} + \tau_{m_3} + \tau_{m_4}. \quad (20)$$

Кроме того, на каждом этапе прогрева-нагружения контролировалась начальная температура среды ( $Fo = 0$ ), определяемая по формуле

$$t_C(0) = \frac{1}{R_C} \left\{ J - \Delta t \left[ R_{C_2} - 2 \frac{R_{C_1}}{R_C} \right] \right\}. \quad (21)$$

Она должна быть равна конечной температуре среды на предыдущем этапе. В итоге получаем кусочно-линейную функцию управления тепловым состоянием, обеспечивающую предельно допустимый уровень термонапряженного состояния на протяжении всего процесса прогрева-нагрузки турбоагрегата и минимально возможную продолжительность этого процесса.

Разработанный алгоритм (1)–(21) был использован для выявления возможностей повышения маневренности турбоагрегатов ТЭС типа К-300-240 путем сокращения продолжительности их пусковых режимов. Узлом, лимитирующим время пусков, здесь является цилиндрический участок РСД в начале переднего концевое уплотнения, прилежащий к диску 1-й ступени и имеющий значительные концентраторы напряжений в виде термокомпенсационных канавок и прямоугольных зон в выступах (ступенях) уплотнений.

Основные размеры цилиндра:  $R_1 = 0,06$  м;  $R_2 = 0,36$  м. Необходимые для расчетов геометрические комплексы:  $k = \frac{R_1}{R_2} = \frac{1}{6}$ ;  $\ln k = -\ln 6 = -1,79$ ;  $k^2 = \frac{1}{36} = 2,78 \cdot 10^{-2}$ ;  $k^4 = 7,72 \cdot 10^{-4}$ ;  $k^6 = 2,15 \cdot 10^{-5}$ ;  $d = 2,056$ ;  $B = 0,04535$ ;  $R_C = 0,2304$ ;  $R_{C_1} = 1,52 \cdot 10^{-2}$ ;  $\frac{R_{C_1}}{R_C} = 6,6 \cdot 10^{-2}$ . При расчетах было принято  $K_{кц} = 3$ .

Номинальные (максимальные) параметры среды, омывающей исследуемый узел:  $P_m = 3,04$  МПа;  $t_{C_m} = 510$  °С. Давления на промежуточных режимах определялись по формуле

$$P = P_m \frac{G}{G_m} \sqrt{\frac{T}{T_m}}, \quad T_m = t_{C_m} + 273 \text{ К.}$$

Коэффициент теплоотдачи среды на номинальном режиме  $\alpha_m = 5260$  Вт/м<sup>2</sup> гр. Коэффициенты теплоотдачи на промежуточных режимах определялись по формуле [5]

$$\alpha = \bar{\alpha} \cdot \alpha_m,$$

где  $\bar{\alpha} = \frac{\lambda_{ж}}{\lambda_{жм}} \left( \bar{G} \sqrt{\frac{T_m}{T}} \right)^m$ ;  $\lambda_{ж}$  и  $\lambda_{жм}$  – коэффициенты теплопроводности жидкости (пара), индекс «м» относится к номинальной (максимальной, 100%-й) нагрузке;  $\bar{G} = \frac{G}{G_m}$  – относи-

тельная нагрузка, выраженная через расход среды (пара);  $m$  – показатель степени при числах Рейнольдса в критериальных уравнениях теплообмена.

В связи с тем, что турбоагрегаты ТЭС типа К-300-240, наряду с базовыми, все более несут полупиковые нагрузки, основными пусковыми режимами являются пуски:

1. Из горячего состояния, после остановки на 12 ч; здесь, согласно [5], начальное температурное состояние цилиндрического элемента РСД, лимитирующего пуски,  $t_0 = 400$  °С.

2. Из неостывшего состояния, после остановки на 24 ч,  $t_0 = 355$  °С.

3. Из неостывшего состояния, после остановки на 48 ч (на двое суток, на два выходных дня),  $t_0 = 290$  °С.

4. Из холодного состояния, после монтажа нового или длительных остановок действующего энергооборудования для выполнения различных ремонтов,  $t_0 = 25$  °С (температура машзала).

Первоначально расчеты были выполнены при условии, что на протяжении всего процесса прогрева-нагружения к.т.о. среды выдерживается равным  $\alpha_{m_0}$  (5260 Вт/м<sup>2</sup> гр.), а температура среды в течение всей продолжительности режима изменяется по линейному закону и достигает максимального значения  $t_{C_m} = 510$  °С при 100%-й нагрузке.

Здесь для определения продолжительности пусков  $\tau_{m_0}$  использованы следующие зависимости:

$$t_C(Fo) = t_0 - \frac{\Delta t}{R_C} \left[ R_{C_2} + 2 \left( Fo - \frac{R_{C_1}}{R_C} \right) \right],$$

$$Fo_{m_0} = \frac{R_{C_1}}{R_C} - \frac{1}{2} \left( R_{C_2} + R_C \frac{t_{C_{m_0}} - t_0}{\Delta t} \right), \quad \tau_{m_0} = \frac{R_2^2}{a} Fo_{m_0}.$$

В результате численных исследований получены следующие значения  $\tau_{m_0}$ : при пусках из горячего состояния (после остановки на 12 ч) 0,47 ч; из неостывшего состояния (после остановки на 24 ч) 1,08 ч; после двухсуточной остановки 1,965 ч; из холодного состояния 5,55 ч.

При условии, что лимитирующий цилиндрический элемент будет сплошным (при том же  $R_2 = 0,36$  м) расчетом по формуле (9) были получены следующие значения времени основных пусков в вышеизложенной последовательности: 0,50; 1,10; 2,12; и 6,02 ч. Таким образом, получены близкие, несколько большие значения времени, что обусловлено небольшой разницей в массах элементов (около 3%). Их вполне можно считать контрольными, подтвердившими результаты основных расчетных исследований.

В действительности на промежуточных режимах значения к.т.о. будут меньше  $\alpha_{m_0}$ ; поэтому предельно допустимое термонапряженное состояние достигается только при 100%-й нагрузке, что можно считать некоторым запасом по надежности. В то же время, как уже отмечалось, это некоторый резерв дальнейшего сокращения продолжительности пусков, который используется при выдерживании предельно допустимого термонапряженного состояния в течение всего переходного процесса работы турбины.

Чтобы не увеличивать объема статьи, далее в ней приводятся только окончательные результаты определения продолжительности пусков с использованием опорных режимных точек, представленные в табл. 1–5. Здесь зависящие от температуры теплофизические и механико-прочностные характеристики материала РСД (ст ЭИ415, 20 ХЗМВФ) взяты из работ [3, 4]. В таблицах наглядно показано, как формируется необходимая для расчетов исходная информация. Поскольку при прогреве-нагрузении на внешней поверхности лимитирующего узла возникают отрицательные термические напряжения, предельно допустимые эффективные температурные разности имеют знак «минус».

В таблицах наглядно отражено определение величины  $\Delta t$  методом последовательных приближений. В первом приближении по температурам сред определяются  $\alpha_{лс}$  и  $E_C$ , а затем – значения  $\Delta t_C$ , что подчеркнуто приданием индекса «с». Далее  $\Delta t_C$  используется для определения средних температур цилиндрического элемента, а по ним – значений  $E$ ,  $\alpha_{л}$ ,  $\lambda$ , и  $a$ ; определяется второе приближение  $\Delta t$ , которое оказалось вполне достаточным для выполнения всех последующих расчетов. В нижней части таблиц приведены продолжительности этапов прогрева-нагружения лимитирующего узла, которые в совокупности предопределяют продолжительность пускового режима всего турбоагрегата.

При расчетах продолжительностей пусков из горячего и неостывшего состояний предполагалось, что пароподводящие трубопроводы и клапана предварительно прогреваются паром, отводимым через байпасную систему, который, минуя турбину, поступает непосредственно в конденсатор. Это объясняется тем, что пароподводящие системы при оста-



новке энергоблоков охлаждаются значительно быстрее, чем более массивные турбины. Байпасная система отключается при достижении котлом 30%-й нагрузки.

**Таблица 1. Исходная информация и результаты определения поэтапной и общей рациональной продолжительности прогрева-нагружения турбины при пуске ее из горячего состояния,  $t_0 = 400$  °С,  $\tau_{M0} = 0,47$  ч**

Определяемые показатели	Результаты расчетов				
	0	30	60	80	100
$G/G_M, \%$	0	30	60	80	100
$t_C, \text{°C}$	470	485	495	503	510
$P, \text{МПа}$	0,1	0,93	1,80	2,42	3,04
$\alpha, \text{Вт/м}^2 \text{ гр.}$	400	2100	3600	4500	5260
$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	560	555	551	546,66	541
$\sigma = 1/3\sigma_{0,2}$	187	185	184	182,22	180,34
$E_C \cdot 10^{-5}, \text{МПа}$	1,838	1,829	1,823	1,819	1,816
$\alpha_{ЛС} \cdot 10^6, 1/\text{гр.}$	12,58	12,64	12,68	12,71	12,72
$\alpha_{ЛС} \cdot E_C$	2,31	2,31	2,31	2,31	2,31
$\Delta t_C, \text{°C}$	-56,6	-56,0	-55,7	-55,2	-54,5
$\bar{t} = t_C + \Delta t_C$	413,4	429	439,3	447,8	455,5
$E \cdot 10^{-5}, \text{МПа}$	1,857	1,8542	1,8521	1,8505	1,847
$\alpha_{ЛГ} \cdot 10^6, 1/\text{гр.}$	12,354	12,416	12,457	12,49	12,52
$\alpha_{ЛГ} \cdot E$	2,30	2,302	2,31	2,31	2,31
$\Delta t, \text{°C}$	-57,0	-56,2	-55,7	-55,2	-54,5
$\lambda, \text{Вт/м} \cdot \text{гр.}$	30,46	30,31	30,21	30,12	30,05
$A, \text{м}^2/\text{ч}$	0,0212	0,0208	0,0206	0,02035	0,02015
$F_{0M} \cdot 10^2$	–	0,24	2,94	2,015	1,415
$\tau_{Mi}, \text{ч}$	–	0,015	0,185	0,128	0,091
$\tau_{M2}, \text{ч}$	$\tau_M = \sum \tau_{Mi} = 0,419$				
$\Delta \tau, \text{ч}$	$\Delta \tau = \tau_{M0} - \tau_M = 0,051$				
$\Delta \tau, \%$	$\Delta \tau \cdot \tau_{M0}^{-1} \cdot 100 = 10,8$				

**Таблица 2. Исходная информация и результаты определения поэтапной и общей рациональной продолжительности прогрева-нагружения турбины при пуске ее из неостывшего состояния,  $t_0 = 355$  °С,  $\tau_{M0} = 1,08$  ч**

Определяемые показатели	Результаты расчетов				
	1	2			
	0	30	60	80	100
$G/G_M, \%$	0	30	60	80	100
$t_C, \text{°C}$	400	450	475	495	510
$P, \text{МПа}$	0,1	0,84	1,74	2,39	3,04
$\alpha, \text{Вт/м}^2 \text{ гр.}$	350	2000	3500	4400	5260
$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	588	568	558,5	551	541
$\sigma = 1/3\sigma_{0,2}$	196	189,3	186,1	184	180,34
$E_C \cdot 10^{-5}, \text{МПа}$	1,86	1,85	1,835	1,823	1,816
$\alpha_{ЛС} \cdot 10^6, 1/\text{гр.}$	12,3	12,5	12,6	12,68	12,72
$\alpha_{ЛС} \cdot E_C$	2,29	2,31	2,31	2,31	2,31
$\Delta t_C, \text{°C}$	-59,9	-57,4	-56,4	-55,8	-54,5
$\bar{t} = t_C + \Delta t_C$	340,1	392,6	418,6	439,2	455,5
$E \cdot 10^{-5}, \text{МПа}$	1,92	1,867	1,8563	1,852	1,847
$\alpha_{ЛГ} \cdot 10^6, 1/\text{гр.}$	12,0	12,26	12,374	12,46	12,52

1	2				
$\alpha_{Л} \cdot E$	2,31	2,29	2,30	2,31	2,31
$\Delta t, ^\circ\text{C}$	-59,4	-57,9	-56,7	-55,8	-54,5
$\lambda, \text{Вт/м}\cdot\text{гр.}$	31,08	30,66	30,414	30,21	30,05
$A, \text{м}^2/\text{ч}$	0,0228	0,0216	0,0211	0,0206	0,02015
$\text{Fo}_{\text{Mi}} \cdot 10^2$	-	1,59	5,99	4,24	3,29
$\tau_{\text{Mi}}, \text{ч}$	-	0,096	0,368	0,267	0,211
$\tau_{\text{M}}, \text{ч}$	$\tau_{\text{M}} = \sum \tau_{\text{Mi}} = 0,942$				
$\Delta \tau, \text{ч}$	$\Delta \tau = \tau_{\text{M0}} - \tau_{\text{M}} = 0,138$				
$\Delta \tau, \%$	$\Delta \tau \cdot \tau_{\text{M0}}^{-1} \cdot 100 = 12,8$				

Таблица 3. Исходная информация и результаты определения поэтапной и общей рациональной продолжительности прогрева-нагрузки турбины при пуске ее из неостывшего состояния,  $t_0 = 290 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{\text{M0}} = 1,965 \text{ ч}$ . Вариант 1

Определяемые показатели	Результаты расчетов				
	0	30	60	80	100
$G/G_{\text{M}}, \%$	0	30	60	80	100
$t_{\text{C}}, ^\circ\text{C}$	400	415	460	490	510
$P, \text{МПа}$	0,1	0,85	1,77	2,40	3,04
$\alpha, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{гр.}$	300	2000	3500	4400	5260
$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	588	582	564	553	541
$\sigma = 1/3 \sigma_{0,2}$	196	194	188	184	180,34
$E_{\text{C}} \cdot 10^{-5}, \text{МПа}$	1,86	1,855	1,844	1,826	1,816
$\alpha_{\text{ЛС}} \cdot 10^6, 1/\text{гр.}$	12,3	12,36	12,54	12,66	12,72
$\alpha_{\text{ЛС}} \cdot E_{\text{C}}$	2,29	2,29	2,31	2,31	2,31
$\Delta t_{\text{C}}, ^\circ\text{C}$	-59,9	-59,4	-57,0	-55,7	-54,5
$\bar{t} = t_{\text{C}} + \Delta t_{\text{C}}$	340,1	355,6	403,0	434,3	455,5
$E \cdot 10^{-5}, \text{МПа}$	1,92	1,905	1,854	1,853	1,847
$\alpha_{\text{Л}} \cdot 10^6, 1/\text{гр.}$	12,0	12,075	12,312	12,44	12,52
$\alpha_{\text{Л}} \cdot E$	2,31	2,30	2,29	2,31	2,315
$\Delta t, ^\circ\text{C}$	-59,4	-59,0	-57,5	-55,7	-54,5
$\lambda, \text{Вт/м}\cdot\text{гр.}$	31,08	30,955	30,57	30,25	30,05
$A, \text{м}^2/\text{ч}$	0,0228	0,0224	0,0214	0,0206	0,02015
$\text{Fo}_{\text{Mi}} \cdot 10^2$	-	7,115	10,34	6,6	4,49
$\tau_{\text{Mi}}, \text{ч}$	-	0,412	0,626	0,415	0,289
$\tau_{\text{M}}, \text{ч}$	$\tau_{\text{M}} = \sum \tau_{\text{Mi}} = 1,742$				
$\Delta \tau, \text{ч}$	$\Delta \tau = \tau_{\text{M0}} - \tau_{\text{M}} = 0,223$				
$\Delta \tau, \%$	$\Delta \tau \cdot \tau_{\text{M0}}^{-1} \cdot 100 = 11,3$				

Таблица 4. Исходная информация и результаты определения поэтапной и общей рациональной продолжительности прогрева-нагрузки турбины при пуске ее из неостывшего состояния,  $t_0 = 290 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{\text{M0}} = 1,965 \text{ ч}$ . Вариант 2

Определяемые показатели	Результаты расчетов				
	1	2			
$G/G_{\text{M}}, \%$	0	30	60	80	100
$t_{\text{C}}, ^\circ\text{C}$	400	440	465	490	510
$P, \text{МПа}$	0,1	0,895	1,77	2,40	3,04
$\alpha, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{гр.}$	400	2000	3500	4400	5260

1	2				
$\sigma_{0,2}$ , МПа	588	572	562	553	541
$\sigma = 1/3\sigma_{0,2}$	196	191	187	184	180,34
$E_C \cdot 10^{-5}$ , МПа	1,86	1,852	1,841	1,826	1,816
$\alpha_{ЛС} \cdot 10^6$ , 1/гр.	12,3	12,46	12,56	12,66	12,72
$\alpha_{ЛС} \cdot E_C$	2,29	2,31	2,31	2,31	2,31
$\Delta t_C$ , °С	-59,9	-57,9	-56,7	-55,7	-54,5
$\bar{t} = t_C + \Delta t_C$	340,1	382,1	408,0	434,3	455,5
$E \cdot 10^{-5}$ , МПа	1,92	1,878	1,8583	1,853	1,847
$\alpha_{ЛТ} \cdot 10^6$ , 1/гр.	12,0	12,21	12,333	12,44	12,52
$\alpha_{ЛТ} \cdot E$	2,31	2,29	2,29	2,31	2,315
$\Delta t$ , °С	-59,4	-58,4	-57,1	-55,7	-54,5
$\lambda$ , Вт/м·гр.	31,08	30,74	30,52	30,26	30,05
$A$ , м <sup>2</sup> /ч	0,0228	0,0219	0,0213	0,0206	0,02015
$Fo_{Mi} \cdot 10^2$	-	12,27	6,26	5,79	4,39
$\tau_{Mi}$ , ч	-	0,725	0,381	0,364	0,282
$\tau_M$ , ч	$\tau_M = \sum \tau_{Mi} = 1,752$				
$\Delta \tau$ , ч	$\Delta \tau = \tau_{M0} - \tau_M = 0,213$				
$\Delta \tau$ , %	$\Delta \tau \cdot \tau_{M0}^{-1} \cdot 100 = 10,9$				

Таблица 5. Исходная информация и результаты определения поэтапной и общей рациональной продолжительности прогрева-нагрузки турбины при пуске ее из холодного состояния,  $t_0 = 25$  °С,  $\tau_{M0} = 5,55$  ч

Определяемые показатели	Результаты расчетов				
$G/G_M$ , %	0	30	60	80	100
$t_C$ , °С	100	165	340	430	510
$P$ , МПа	0,1	0,715	1,605	2,305	3,04
$\alpha$ , Вт/м <sup>2</sup> гр.	10000	10000	2800	4000	5260
$\sigma_{0,2}$ , МПа	659	638	594	576	541
$\sigma = 1/3\sigma_{0,2}$	220	213	198	192	180,34
$E_C \cdot 10^{-5}$ , МПа	2,04	2,026	1,92	1,854	1,816
$\alpha_{ЛС} \cdot 10^6$ , 1/гр.	10,6	11,2	12,0	12,42	12,72
$\alpha_{ЛС} \cdot E_C$	2,16	2,27	2,3	2,3	2,31
$\Delta t_C$ , °С	-71,3	-65,7	-60,3	-58,5	-54,5
$\bar{t} = t_C + \Delta t_C$	28,7	100	279,7	371,5	455,5
$E \cdot 10^{-5}$ , МПа	2,06	2,04	1,97	1,89	1,8467
$\alpha_{ЛТ} \cdot 10^6$ , 1/гр.	10,6	10,6	11,74	12,16	12,522
$\alpha_{ЛТ} \cdot E$	2,18	2,16	2,31	2,30	2,31
$\Delta t$ , °С	-70,5	-69,0	-60,0	-58,4	-54,5
$\lambda$ , Вт/м·гр.	38,4	35,6	31,72	30,82	30,05
$A$ , м <sup>2</sup> /ч	0,0364	0,032	0,0244	0,0221	0,02015
$Fo_{Mi} \cdot 10^2$	0	7,72	34,69	18,59	17,94
$\tau_{Mi}$ , ч	0	0,313	1,840	1,090	1,155
$\tau_M$ , ч	$\tau_M = \sum \tau_{Mi} = 1,752$				
$\Delta \tau$ , ч	$\Delta \tau = \tau_{M0} - \tau_M = 0,213$				
$\Delta \tau$ , %	$\Delta \tau \cdot \tau_{M0}^{-1} \cdot 100 = 10,9$				

При пусках из холодного состояния байпасная система не работает. Здесь пар, конденсируясь, напрямую проходит весь тракт: пароподводящая система – турбина – конденсатор. Конденсация пара при прогреве турбоустановки заканчивается приблизительно при достижении 30%-й нагрузки, что и отражено в задании граничных условий теплообмена на этапе прогрева-нагружения от 0 до 30% в табл. 5 ( $t_{C_{м1}} = 165\text{ }^{\circ}\text{C}$  – температура насыщения при  $P = 0,715\text{ МПа}$ ;  $\alpha_{м1} = 10000\text{ Вт/м}^2\text{ гр.}$  – к.т.о. при конденсации пара).

В концах таблиц обобщены результаты выполненных исследований по всем основным пускам из различных начальных тепловых состояний. Показано, что при выдерживании термических напряжений на предельно допустимом уровне в наиболее нагруженных узлах турбины типа К-300-240 на основных промежуточных нагрузках (в основных опорных режимных точках) можно существенно сократить продолжительность ее прогрева-нагружения по сравнению с режимами, где предельно допустимое термонапряженное состояние возникает только при достижении 100%-й нагрузки. Так, при пусках из горячего и неостывшего состояний это сокращение составляет 10-13%, при пусках из холодного состояния – около 21%. Таким образом, выявлены существенные резервы повышения маневренности мощных турбоагрегатов ТЭС типа К-300-240.

### Выводы

Современные энергосистемы резко изменяют свою нагрузку в ночные часы, выходные и праздничные дни, а также в теплый и холодный периоды года. Поэтому мощные базовые паротурбинные энергоблоки ТЭС все более начинают работать как полупиковые и пиковые. Поскольку в Украине в перспективе создание специализированных блоков маловероятно, целесообразно модернизировать широко используемые турбоагрегаты типа К-300-240 с целью надежного и экономичного несения ими не только базовых (основных), но также полупиковых и пиковых нагрузок.

Повышение энергоэффективности (маневренность, надежность, экономичность) энергоблоков такого широкого функционального использования предлагается производить на основе постановки и решения задач рационального (субоптимального) управления тепловым состоянием мощных паротурбинных агрегатов (задача субоптимального синтеза их теплового состояния на установившихся и переходных режимах работы). С этой целью были усовершенствованы методы и развиты решения практически важных задач управления тепловым состоянием наиболее термонапряженных деталей и узлов паровых турбин.

Развит метод построения функций рационального управления тепловым состоянием паротурбинных агрегатов. В данной работе предложено формирование функций управления тепловым состоянием с доведением на каждом опорном промежуточном и номинальном режимах работы (25–30, 50–60, 75–80, 100%) термических напряжений в наиболее нагруженных деталях до предельно допустимого уровня.

В предыдущих работах [3, 5] это достигалось только на режиме 100%. И здесь продолжительность прогрева-нагружения турбины составляла: при пуске из горячего состояния (после остановки на 12 ч) 0,47 ч; при пуске из неостывшего состояния (после остановки на 24 ч) 1,08 ч; при пуске после двухсуточной остановки 1,97 ч; при пуске из холодного состояния (начальная температура деталей турбины 25 °С) 5,55 ч. Развитие метода построения функций управления тепловым состоянием позволяет сократить эти продолжительности. Так, при пусках из горячего и неостывшего состояний сокращение составляет 10–13%, при пусках из холодного состояния – около 21%. Таким образом, выявлены возможности существенного повышения маневренности мощных турбоагрегатов ТЭС типа К-300-240.

### Литература

1. *Переверзев Д. А.* Синтез рационального теплового состояния теплоэнергетического оборудования / Д. А. Переверзев. – Киев: Наук. думка, 1987. – 136 с.
2. *Переверзев Д. А.* Задачи управления тепловым состоянием роторов турбомашин / Д. А. Переверзев, В. А. Кострыкин // Энерг. машиностроение. – 1978. – Вып. 26. – С. 77–82.

3. *Переверзев Д. А.* О формировании граничных условий теплообмена при совершенствовании показателей маневренности мощных паротурбинных агрегатов / Д. А. Переверзев, А. Г. Лебедев // Пробл. машиностроения. – 2006. – Т. 9, № 2. – С. 3–14.
4. *Михайлов-Михеев П. Б.* Справочник по металлическим материалам турбино- и моторостроения / П. Б. Михайлов-Михеев. – М., Л.: Машгиз, 1961. – 838 с.
5. *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  
21.04.11