

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-459-468>

УДК 536.27

Экспериментально-теоретическое исследование температуры цилиндра высокого давления турбины Т-100-130

В. А. Кудинов¹, Е. В. Котова¹, О. Ю. Курганова¹, В. К. Ткачев¹

¹Самарский государственный технический университет (Самара, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Приведены результаты экспериментально-теоретических исследований температурного состояния цилиндра высокого давления (ЦВД) паровой турбины Т-100-130 для одного из режимов пуска. С учетом зависимости коэффициента линейного расширения от температуры найдены удлинения находящихся при различной температуре отдельных участков корпуса и его суммарное удлинение после выхода турбины на стационарный режим работы. Выполненные исследования показали, что в процессе пуска турбины наблюдается существенная разность температур по длине корпуса ЦВД. При этом наиболее интенсивный прогрев происходит на участке со второго по шестое сечения. Наибольшая разность температур наблюдается в стационарном режиме работы при максимальной температуре в пятом сечении. Используя ортогональный метод Л. В. Канторовича, получено приближенное аналитическое решение задачи теплопроводности для двухслойной стенки (корпус турбины – тепловая изоляция) при неоднородных граничных условиях третьего рода. С использованием экспериментальных данных по температурному состоянию наружной поверхности корпуса ЦВД путем решения обратной задачи теплопроводности найдены средние за период пуска коэффициенты теплоотдачи, характеризующие интенсивность передачи теплоты от пара к корпусу. На основе экспериментальных данных по изменению температуры любого из контролируемых параметров турбины во времени разработан теоретический метод прогноза ее изменения в некотором диапазоне времени, отсчитываемом от времени последнего измерения. Использование данного метода для прогноза изменения разности температур верха и низа корпуса ЦВД в процессе пуска показало, что на период времени 3–5 мин прогноз выполняется с высокой достоверностью.

Ключевые слова: паровая турбина, экспериментальные исследования температуры, расчет удлинения корпуса, прямая и обратная задачи теплопроводности, коэффициенты теплоотдачи, прогноз изменения параметров

Для цитирования: Экспериментально-теоретическое исследование температуры цилиндра высокого давления турбины Т-100-130 / В. А. Кудинов [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62. № 5. С. 459–468. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-459-468>

Experimental and Theoretical Research of a Hot Condition of High Pressure Cylinder of the T-100-130 Steam Turbine

V. A. Kudinov¹, E. V. Kotova¹, O. Yu. Kurganova¹, V. K. Tkachev¹

¹Samara State Technical University (Samara, Russian Federation)

Abstract. The results of experimental and theoretical studies of the temperature state of the high-pressure cylinder (HPC) of the T-100-130 steam turbine for one of the start modes are presented.

Адрес для переписки

Кудинов Василий Александрович
Самарский государственный
технический университет
ул. Молодогвардейская, 244
443100, г. Самара, Российская Федерация
Тел. +8 846 332-42-35
totig@yandex.ru

Address for correspondence

Kudinov Vasilij A.
Samara State
Technical University
244 Molodogvardejskaya str.,
443100, Samara, Russian Federation
Tel.: +8 846 332-42-35
totig@yandex.ru

Taking into account the dependence of the coefficient of linear expansion on the temperature, the elongations of the individual sections of the casing under different temperatures and its total elongation after the turbine operation starts to correspond to the stationary operation mode have been found. The studies have shown that in the process of actuation the turbine there is a significant difference in temperature along the length of the HPC casing. In this case, the most intense heating occurs in the area from the second to the sixth section. The greatest temperature difference was observed in stationary operation at maximum temperature in the fifth section. Using the orthogonal method of L. V. Kantorovich, an approximate analytical solution of the thermal conductivity problem for a two-layer wall (turbine casing – thermal insulation) under inhomogeneous boundary conditions of the third kind is obtained. With the use of experimental data on the temperature state of the outer surface of the casing of the HPC by solving the inverse problem of thermal conductivity, the average heat transfer coefficients for the actuation period characterizing the intensity of heat transfer from steam to the casing have been found. On the basis of experimental data on the temperature change of any of the controlled parameters of the turbine over time, a theoretical method for predicting its change in a certain time range from the time of its last measurement has been developed. The use of this method to predict the change in the temperature difference between the top and bottom of the HPC casing during the actuation showed that for a period of time equal to 3–5 minutes the forecast is fulfilled with high reliability.

Keywords: steam turbine, temperature experimental studies, calculation of the casing lengthening, direct and inverse heat conduction problems, heat transfer coefficients, forecast of change of parameters

For citation: Kudinov V. A., Kotova E. V., Kurganova O. Yu., Tkachev V. K. (2019) Experimental and Theoretical Research of a Hot Condition of High Pressure Cylinder of the T-100-130 Steam Turbine. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (5), 459–468. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-459-468> (in Russian)

Пуск турбины Т-100-130 может сопровождаться проблемами, связанными со значительными перепадами температур между верхней и нижней частью корпуса, между фланцами и шпильками, разностью удлинений вала и корпуса турбины и проч. В случаях, если указанные параметры превышают допустимые значения, установленные соответствующими инструкциями по пуску, процесс пуска следует прекращать. Эти проблемы наиболее актуальны для цилиндра высокого давления (ЦВД), так как он работает при более высоких температурах в сравнении с другими корпусами турбины. Корпус ЦВД турбины Т-100-130 содержит шесть штатных термопар, размещенных в 5-м сечении (рис. 1), – сверху, снизу, на фланцах и шпильках. Для выполнения расчетов температур по длине корпуса информация от такого числа термопар недостаточна. С целью получения более подробной информации были выполнены работы, связанные с термометрированием внешней поверхности ЦВД турбины, а также проведены исследования его температуры в процессах пуска. Термопары устанавливались в семи сечениях (рис. 1), участки между ними отмечены римскими цифрами. В сечении 1 имеются три термопары: 1:1 – левый фланец, 1:2 – верх, 1:3 – правый фланец. В сечениях 2, 3, 4 расположено по одной термопаре (2:1, 3:1, 4:1) сверху корпуса. В штатном сечении 5 – шесть термопар: 5:1 – левый фланец; 5:2 – верх; 5:3 – правый фланец; 5:4 – левая шпилька; 5:5 – правая шпилька; 5:6 – низ. В сечении 6 – одна термопара: 6:1 – верх. В сечении 7 размещены три термопары: 7:1 – левый фланец; 7:2 – верх; 7:3 – правый фланец [1].

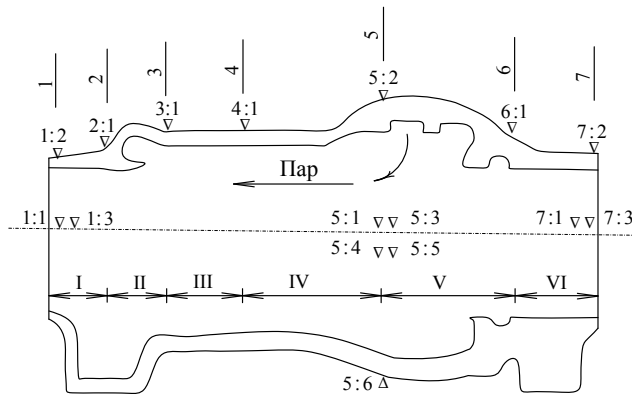


Рис. 1. Схема установки термодпар в сечениях цилиндра высокого давления:
 1, 2, 3, ... – сечения корпуса; 1:1, 1:2, 1:3, 2:1; 3:1, ... – термодпары

Fig. 1. The scheme of installation of the thermocouples in cross sections of high-pressure cylinder:
 1, 2, 3, ... – cross sections of the casing; 1:1, 1:2, 1:3, 2:1; 3:1, ... – thermocouples

Результаты исследований температуры корпуса ЦВД в режиме пуска приведены на рис. 2. Их анализ позволяет заключить, что более интенсивно прогреваются участки II–V (рис. 1). Наименьшая температура наблюдается в первом и седьмом сечениях.

Температурное поле по окружности корпуса оказывается достаточно равномерным. Разность температур между верхом, низом и фланцами в процессе пуска не превышает 20 °С. В связи с этим каждый отдельный участок турбины можно приближенно принимать в виде полого цилиндра с осесимметричной температурой. Исходя из этих предположений были найдены температурные удлинения каждого отдельного участка и всего корпуса ЦВД в целом. Для этого по значениям температур на концах каждого участка определялась средняя температура, которая использовалась для нахождения температурного расширения материала корпуса на

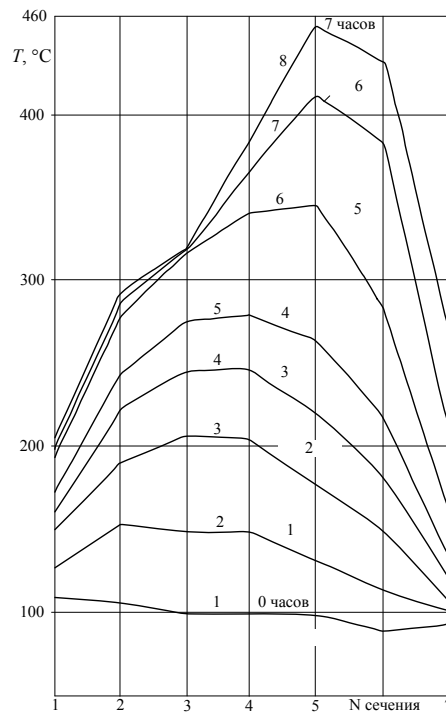


Рис. 2. Распределение температуры в верхней части цилиндра высокого давления в процессе пуска (кривые 1–8):
 8 – стационарное состояние

Fig. 2. Temperature distribution at the top of the high pressure cylinder during actuation (curves 1–8):
 8 – stationary state

данном участке. Суммированием температурных расширений всех участков определялось осевое расширение всего корпуса ЦВД турбины.

Удлинение каждого отдельного участка корпуса турбины определялось по формуле [2]

$$\Delta L_i = \alpha(T) \Delta T_i \Delta l_i, \quad i = \overline{1, 6}, \quad (1)$$

где ΔL_i – удлинение i -го участка; $\alpha(T)$ – коэффициент линейного расширения; $\Delta T_i = T_{\text{ср}i} - T_0$ – разность между средней текущей температурой корпуса турбины $T_{\text{ср}i}$ i -го участка и его температурой в ненагретом состоянии $T_0 = 20$ °С; Δl_i – длина i -го участка корпуса в ненагретом состоянии.

Ввиду большого диапазона изменения температур корпуса (от 20 до 450 °С), необходимо учитывать температурную зависимость коэффициента линейного расширения. Его значения в зависимости от температуры для стали 12Х1МФ приведены в табл. 1 [3]. Анализ этой зависимости позволяет заключить, что она близка к линейной и может быть аппроксимирована соотношением

$$\alpha(T) \cdot 10^6 = \mu + \nu T,$$

где $\mu = 12$; $\nu = 0,007$ – коэффициент аппроксимации.

Таблица 1

Зависимость коэффициента термического расширения от температуры

Dependence of thermal expansion coefficient on temperature

$T_0, \text{°C}$	50	100	200	300	400	500
$\alpha \cdot 10^{-6}, 1/\text{K}$	11,4	12,6	13,3	14,4	14,9	15,2

Формула (1) позволяет найти удлинение каждого участка корпуса в любой момент времени процесса пуска. Длины отдельных участков до начала пуска были следующие: I – 0,28 м; II – 0,28; III – 0,42; IV – 0,63; V – 0,77; VI – 0,525 м. Суммарная длина корпуса в ненагретом состоянии $L = 2,905$ м. Определяя удлинения каждого участка корпуса после выхода турбины на стационарный режим (рис. 2, кривая 8), находим суммарное удлинение корпуса $\Delta L = 14,79$ мм в сравнении с ненагретым состоянием.

Возможность непрерывного текущего контроля параметров турбины позволяет выполнять прогноз изменения какого-либо параметра на отрезке времени, последующем за временем его текущего измерения. Такой прогноз выполняется согласно следующему алгоритму. Сначала находится закономерность изменения данного параметра на некотором отрезке времени, предшествующем его текущему измерению. Величина прогнозируемого параметра (пусть это будет разность температур верхней и нижней частей корпуса) представляется в виде

$$\Delta T = A + Bt + Ct^2, \quad (2)$$

где ΔT – разность температур верхней и нижней частей корпуса ЦВД; t – время; A, B, C – неизвестный коэффициент.

Допустим, что при измерении, выполненном в момент времени t_3 (текущее измерение), разность температур составляла ΔT_3 , а в моменты времени t_1 и t_2 , предшествующие времени измерения t_3 , она соответственно была равна ΔT_1 и ΔT_2 . Используя значения замеренных параметров, соотношение (2) может быть записано в виде:

$$\left. \begin{aligned} \Delta T_1 &= A + Bt_1 + Ct_1^2; \\ \Delta T_2 &= A + Bt_2 + Ct_2^2; \\ \Delta T_3 &= A + Bt_3 + Ct_3^2. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Выражения (3) представляют систему трех алгебраических линейных уравнений с тремя неизвестными A, B, C . После нахождения неизвестных из решения этой системы соотношение (2) может быть использовано для прогноза изменения величины ΔT на некотором отрезке времени, отсчитываемом от времени текущего измерения. При этом полагается, что закон изменения прогнозируемого параметра на отрезке времени за текущим измерением будет таким же, как и до момента его измерения. Следовательно, точность предсказания параметра будет тем выше, чем меньшими отрезки времени до и после текущего измерения.

Наиболее важными параметрами, прогноз которых необходимо выполнять при пуске турбины, являются: разность удлинений вала и корпуса; разность температур верхней и нижней частей корпуса; искривление вала турбины; показатели вибрации подшипников и другие параметры, характеризующиеся их монотонным изменением. Использование данной методики при пуске турбины показало, что прогноз изменения разности температур верха и низа корпуса ЦВД на период времени 3–5 мин последующими измерениями этого параметра подтверждается с высокой достоверностью. Отметим, что за это время в ряде случаев могут быть приняты превентивные меры по недопущению выхода параметра за пределы допустимых величин.

Значения температур, найденные из эксперимента, были использованы для оценки коэффициентов теплоотдачи при переносе теплоты от пара к корпусу ЦВД турбины. Они находились путем решения обратной задачи. Для этого было найдено решение задачи теплопроводности для двухслойной стенки (корпус турбины – тепловая изоляция). Постановка задачи в данном случае имеет вид (рис. 3) [1, 4, 5]:

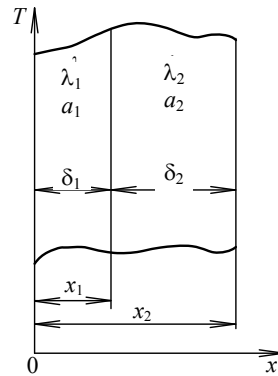


Рис. 3. Схема двухслойной конструкции

Fig. 3. The scheme of the two-layer design

$$\frac{\partial T_i(x,t)}{\partial t} = a_i \frac{\partial^2 T_i(x,t)}{\partial x^2}, \quad t > 0; \quad x_{i-1} < x < x_i; \quad i = 1, 2; \quad x_0 = 0; \quad x_2 = \delta; \quad (4)$$

$$T_i(x, 0) = T_0, \quad i = 1, 2; \quad (5)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(0, t)}{\partial x} + \alpha_1 [T_{\text{cp1}} - T_1(0, t)] = 0; \quad (6)$$

$$T_1(x_1, t) = T_2(x_1, t); \quad (7)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(x_1, t)}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(x_1, t)}{\partial x}; \quad (8)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2(\delta, t)}{\partial x} + \alpha_2 [T_2(\delta, t) - T_{\text{cp2}}] = 0, \quad (9)$$

где T_i – температура i -го слоя ($i = 1, 2$); x – координата; t – время; $\delta = \delta_1 + \delta_2$ – суммарная толщина двухслойной стенки; λ_i, a_i – коэффициент теплопроводности и температуропроводности i -го слоя ($i = 1, 2$); T_0 – начальная температура; α_1, α_2 – коэффициент теплоотдачи со стороны пара и окружающей среды; $T_{\text{cp1}}, T_{\text{cp2}}$ – температура пара и окружающей среды.

Введем следующие безразмерные переменные и параметры:

$$\Theta_i = \frac{T_i - T_{\text{cp2}}}{T_0 - T_{\text{cp2}}}; \quad \xi = \frac{x}{\delta}; \quad \text{Fo} = \frac{at}{\delta^2}; \quad \text{Bi}_1 = \frac{\alpha_1 \delta}{\lambda_1}; \quad \text{Bi}_2 = \frac{\alpha_2 \delta}{\lambda_2}; \quad \Delta T = \frac{T_{\text{cp1}} - T_{\text{cp2}}}{T_0 - T_{\text{cp2}}},$$

где Θ_i – безразмерная температура ($i = 1, 2$); Fo – число Фурье (безразмерное время); ξ – безразмерная координата; Bi_1, Bi_2 – число Био; a – наименьший из коэффициентов температуропроводности a_i ($i = 1, 2$).

С учетом обозначений задача (4)–(9) запишется следующим образом:

$$\frac{\partial \Theta(\xi, \text{Fo})}{\partial \text{Fo}} = \frac{a_i}{a} \frac{\partial^2 \Theta(\xi, \text{Fo})}{\partial \xi^2}, \quad \text{Fo} > 0; \quad \xi_{i-1} < \xi < \xi_i; \quad i = 1, 2; \quad \xi_0 = 0; \quad \xi_2 = 1; \quad (10)$$

$$\Theta_i(\xi, 0) = 1, \quad i = 1, 2; \quad (11)$$

$$\frac{\partial \Theta_1(0, \text{Fo})}{\partial \xi} + \text{Bi}_1 [\Delta T - \Theta_1(0, \text{Fo})] = 0; \quad (12)$$

$$\Theta_1(\xi_1, \text{Fo}) = \Theta_2(\xi_1, \text{Fo}); \quad (13)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial \Theta_1(\xi_1, \text{Fo})}{\partial \xi} = \lambda_2 \frac{\partial \Theta_2(\xi_1, \text{Fo})}{\partial \xi}; \quad (14)$$

$$\frac{\partial \Theta_2(1, \text{Fo})}{\partial \xi} + \text{Bi}_2 \Theta_2(1, \text{Fo}) = 0, \quad (15)$$

где (13), (14) – условия сопряжения, записанные в виде равенства температур и тепловых потоков на контакте слоев ($\xi = \xi_1$).

Запишем решение задачи (10)–(15), используя интегральный метод теплового баланса [6–9], в виде [1]

$$\Theta_i(\xi, Fo) = A_i + D_i \xi + f(Fo) \varphi_i(\xi), \quad i = 1, 2, \quad (16)$$

где

$$A_1 = Bi_1 \Delta T (Bi_2 \xi_1 (\lambda_2 - \lambda_1) + \lambda_1 (1 + Bi_2)) / r; \quad A_2 = Bi_1 \Delta T \lambda_1 (1 + Bi_2) / r;$$

$$D_1 = -Bi_1 \Delta T Bi_2 (\lambda_2 / r); \quad D_2 = -\lambda_1 Bi_1 \Delta T (Bi_2 / r);$$

$$r = \lambda_1 Bi_1 (1 - Bi_2 (\xi_1 - 1)) + Bi_2 \lambda_2 (1 + \xi_1 Bi_1);$$

$$\varphi_1(\xi) = 2r_2 / r_1 + Bi_1 F \xi - \xi^2 (2\lambda_2 \xi_1 + Bi_1 \lambda_1 N + Bi_1 \xi_1^2 (2\lambda_2 - \lambda_1)) / (r_1 \xi_1);$$

$$\varphi_2(\xi) = (Bi_2 + 2) / Bi_2 - \xi^2; \quad r_2 = (Bi_2 + 2) \lambda_1 / Bi_2 - \xi_1^2 (\lambda_1 - \lambda_2);$$

$$f(Fo) = C_1 \exp \left(- \frac{6(\mu_4 + \mu_5 + \mu_8 + 2Bi_2 a_2 \lambda_1 (\xi_1 - 1) - 2Bi_1 a_1 \lambda_1) Fo}{\mu_6 + Bi_2 \xi_1^2 \lambda_1 (Bi_1 + \xi_1) - 4Bi_2 \xi_1^3 \lambda_2 + \mu_9 - \mu_7} \right);$$

$$\mu_4 = Bi_1 Bi_2 \xi_1^2 a_1 (\lambda_1 - \lambda_2); \quad \mu_5 = Bi_1 Bi_2 \xi_1 a_2 \lambda_1 (\xi_1 - 1); \quad \mu_6 = Bi_1 Bi_2 \xi_1^4 (\lambda_1 - \lambda_2);$$

$$\mu_7 = \lambda_1 (6Bi_1 \xi_1 - 4Bi_1 - 12); \quad \mu_8 = Bi_1 Bi_2 a_1 (\lambda_1 - 2\lambda_2); \quad \mu_9 = 2Bi_1 \xi_1 \lambda_1 (\xi_1 - Bi_2);$$

$$C_1 = \frac{3(r_3 - r_4 - Bi_1 \Delta T \lambda_1 (2 + Bi_2) + 2Bi_1 \lambda_1 (Bi_2 + 1) - 2\lambda_2 Bi_2) (2 + \xi_1 Bi_1) \lambda_1 Bi_2}{2(r_5 - \lambda_1 Bi_1 - \lambda_2 Bi_2 - \lambda_1 Bi_1 Bi_2) (r_6 + r_7 + r_8 + 12\lambda_1 - 6\xi_1 Bi_1 \lambda_1)};$$

$$r_3 = Bi_1 Bi_2 \Delta T \xi_1 (\lambda_2 - \lambda_1); \quad r_4 = 2Bi_1 Bi_2 \xi_1 (\lambda_1 - \lambda_2); \quad r_5 = \xi_1 Bi_1 Bi_2 (\lambda_1 - \lambda_2);$$

$$r_6 = 4\xi_1^3 Bi_2 (\lambda_1 - \lambda_2); \quad r_7 = \lambda_1 Bi_1 Bi_2 \xi_1 (\xi_1 + \xi_1^3 - 2); \quad r_8 = \xi_1^2 Bi_1 (2\lambda_1 - \xi_1^2 \lambda_2 Bi_2).$$

Температурные кривые, найденные на основе данных рис. 1, показаны на рис. 4.

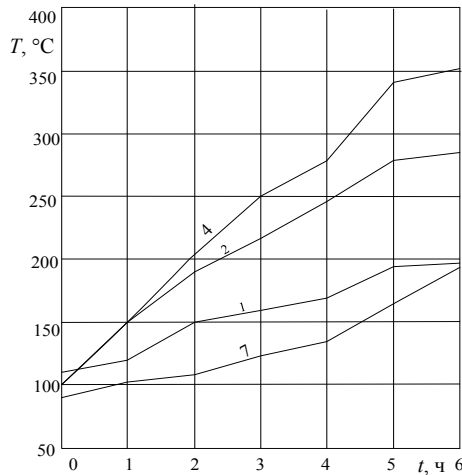


Рис. 4. Изменение температуры во времени в верхней части корпуса турбины: 1, 2, 4, 7 – номер сечения (рис. 1)

Fig. 4. Temperature change over time at the top of the turbine casing: 1, 2, 4, 7 – section number (fig. 1)

Из анализа рис. 4 следует, что кривые 1, 4 можно аппроксимировать линейной зависимостью во времени, а 2, 7 – квадратичной:

$$T(t) = v_1 + v_2 t; \quad T(t) = v_1 + v_2 t + v_3 t^2, \quad (17)$$

где v_1, v_2, v_3 – коэффициент аппроксимации.

Значения коэффициентов аппроксимации для всех кривых приведены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты аппроксимации экспериментальных значений температуры
The coefficients of approximation of experimental temperature values

Коэффициент аппроксимации	Номер сечения корпуса турбины согласно рис. 1			
	1	2	4	7
v_1	110	105	100	90
v_2	14	44,83	42,17	4,37
v_3		-2,5		2,1

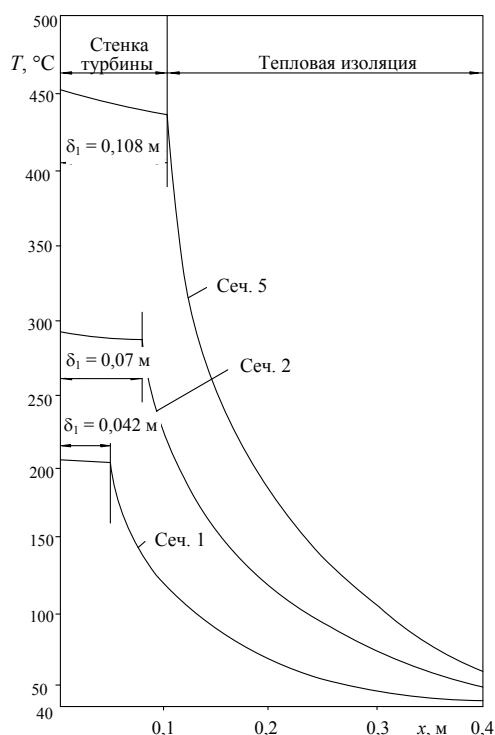


Рис. 5. Изменения температуры по толщине двухслойной (металл – тепловая изоляция) стенки цилиндра высокого давления турбины в различных сечениях по длине корпуса (рис. 2)

Fig. 5. Temperature changes over the thickness of the two-layer (metal – thermal insulation) high-pressure cylinder wall of the turbine in different sections along the length of the casing (fig. 2)

Выражения (17) посредством решения обратной задачи теплопроводности были использованы для нахождения коэффициентов теплоотдачи α_1 на внутренней поверхности стенки турбины [1, 4, 10]. Для задачи (4)–(9) формулами (17) определяется температура на контакте слоев $x = x_1$, т. е. $T(x, t) = T(x_1, t)$. Подставляя соотношения (17), приведенные к безразмерному виду, в левую часть (16) относительно $Bi = \alpha_1 \delta / \lambda_1$ для каждого сечения получаем трансцендентное уравнение. Из решения этого уравнения находится Bi_1 , а следовательно, и α_1 . Используя (16) и (17), определены средние за время пуска коэффициенты теплоотдачи в тех точках корпуса ЦВД, где были установлены термодпары. Их величины соответственно со второго по шестое сечение оказались следующими: 12, 20, 36, 35 и 11 Вт/(м²·К).

Из анализа результатов следует, что наименьшие α_1 наблюда-

даются в сечениях, где находятся обоймы диафрагм. В пространстве между ними скорости движения пара малы (застойные зоны). Максимальные α_1 отмечены в зоне высоких температур и скоростей течения пара [1].

Найденные величины коэффициентов теплоотдачи были использованы для определения температуры по толщине стенки и тепловой изоляции для сечений 1, 2, 5 (рис. 5). Анализ полученных результатов позволяет заключить, что наибольший перепад температуры по толщине металлической стенки, составляющий $8,2^\circ\text{C}$, наблюдается в пятом сечении, т. е. в той части корпуса, где толщина стенки наибольшая ($\delta_1 = 0,108\text{ м}$).

Для решения задачи брали следующие исходные данные: $\lambda_1 = 37\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $\lambda_2 = 0,8\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $a_1 = 0,8 \cdot 10^{-5}\text{ м}^2/\text{с}$; $a_2 = 0,8 \cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$; $\delta_2 = 0,3\text{ м}$; $\alpha_2 = 10\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$; $t_{\text{ср}} = 30^\circ\text{C}$.

ВЫВОДЫ

1. По результатам экспериментально-теоретических исследований температурного состояния корпуса цилиндра высокого давления турбины Т-100-130 в процессе пуска найдена величина его осевого удлинения, составляющая $14,79\text{ мм}$ (при полном прогреве корпуса и выходе турбины на стационарный режим работы).

2. Разработана методика, позволяющая по изменениям отдельных параметров до текущего измерения выполнять их прогноз изменения на некотором последующем диапазоне времени. Практическое применение методики в процессе конкретных пусков турбины показало, что прогноз изменения разности температур верха и низа корпуса цилиндра высокого давления последующими измерениями этого параметра подтверждается с высокой достоверностью.

3. Используя найденные из решения обратной задачи теплопроводности коэффициенты теплоотдачи, получены кривые изменения температуры в различных сечениях корпуса ЦВД с учетом тепловой изоляции на внешней поверхности стенки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках базовой части государственного задания ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (проект № 1.5551.2017/8.9).

ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование термонапряженного состояния цилиндра высокого давления паровой турбины Т-100-130 / В. А. Кудинов [и др.] // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2018. № 3. С. 78–91.
2. Тимошенко, С. П. Теория упругости / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер. М.: Наука, 1979. 560 с.
3. Неймарк, Б. Е. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике / Б. Е. Неймарк. М.: Энергия, 1967. 200 с.

4. Кудинов, В. А. Аналитические решения задач тепломассопереноса и термоупругости для многослойных конструкций / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, В. В. Калашников. М.: Высш. шк., 2005. 429 с.
5. Кудинов, В. А. Теплопроводность и термоупругость в многослойных конструкциях / В. А. Кудинов, Б. В. Аверин, Е. В. Стефанюк. М.: Высш. шк., 2008. 305 с.
6. Гудмен, Т. Применение интегральных методов в нелинейных задачах нестационарного теплообмена / Т. Гудмен // Проблемы теплообмена: сб. науч. тр. М.: Атомиздат, 1967. С. 41–96.
7. Тимошпольский, В. И. Теоретические основы теплофизики и термомеханики в металлургии / В. И. Тимошпольский, Ю. С. Постольник, Д. Н. Андрианов. Минск: Беларус. наука, 2005. 560 с.
8. Глазунов, Ю. Т. Вариационные методы / Ю. Т. Глазунов. М.; Ижевск: Ин-т компьютер. исслед., 2006. 470 с.
9. Кудряшов, Л. И. Приближенные решения нелинейных задач теплопроводности / Л. И. Кудряшов, Н. А. Меньших. М.: Машиностроение, 1979. 232 с.
10. Шумаков, Н. В. Метод последовательных интервалов в теплотрии нестационарных процессов / Н. В. Шумаков. М.: Атомиздат, 1979. 216 с.

Поступила 04.01.2019 Подписана в печать 26.03.2019 Опубликована онлайн 30.09.2019

REFERENCES

1. Kudinov V. A., Kurganova O. Yu., Gavrilova T. E., Stefanyuk E. V., Kudinov I. V. (2018) Study of Thermal Stress State of the High-Pressure Cylinder of the T-100-130 Steam Turbine. *Prostranstvo, Vremya i Fundamental'nye Vzaimodeistviya = Space, Time and Fundamental Interactions*, (3), 78–91 (in Russian).
2. Timoshenko S. P., Gud'er Dzh. (1979) *Elasticity Theory*. Moscow, Nauka Publ. 560 (in Russian).
3. Neimark B. E. (1967) *Physical Properties of Steels and Alloys Used in Power Engineering*. Moscow, Energiya Publ. 200 (in Russian).
4. Kudinov V. A., Kartashov E. M., Kalashnikov V. V. (2005) *Analytical Solutions of Heat and Mass Transfer Problems as Well as of Thermoelasticity Problems for Multilayer Structures*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 429 (in Russian).
5. Kudinov V. A., Averin B. V., Stefanyuk E. V. (2008) *The Thermal Conductivity and Thermoelasticity for Multilayer Structures*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 305 (in Russian).
6. Gudmen T. (1967) Application of Integral Methods in Nonlinear Problems of Unsteady Heat Transfer. *Problemy Teploobmena: Sb. Nauch. Tr.* [Heat Transfer Problems: Collected Proceedings]. Moscow, Atomizdat Publ., 41–96 (in Russian).
7. Timoshpol'skii V. I., Postol'nik Yu. S., Andrianov D. N. (2005) *Theoretical Foundations of Thermal Physics and Thermomechanics in Metallurgy*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. 560 (in Russian).
8. Glazunov Yu. T. (2006) *Variational Methods*. Moscow – Izhevsk, Research Centre of “Regular and Chaotic Dynamics”, Institute of Computer Research. 470 (in Russian).
9. Kudryashov L. I., Men'shikh N. A. (1979) *Approximate Solutions of Nonlinear Heat Conduction Problems*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 232 (in Russian).
10. Shumakov N. V. (1979) *The Method of Successive Intervals in Heat Measurements of Non-Stationary Processes*. Moscow, Atomizdat Publ. 216 (in Russian).

Received: 4 January 2019 Accepted: 26 March 2019 Published online: 30 September 2019