

УДК 536.2(075)

© Кудинов В. А., Курганова О. Ю., Гаврилова Т. Е., Стефанюк Е. В., Кудинов И. В., 2018

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ Т – 100 – 130 *

Кудинов В. А.^{а,1}, Курганова О. Ю.^{а,2}, Гаврилова Т. Е.^{а,3}, Стефанюк Е. В.^{а,4}, Кудинов И. В.^{а,5}

^а ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара, 443100, Россия

Приводятся результаты экспериментальных и теоретических исследований температурного и термонапряженного состояния корпуса цилиндра высокого давления (ЦВД) паровой турбины Т-100-130 в режиме запуска. Используя метод Л.В. Канторовича, получено приближенное аналитическое решение задачи теплопроводности для двухслойной стенки турбины (металлически корпус – тепловая изоляция) при неоднородных граничных условиях третьего рода. На основе найденного аналитического решения, используя экспериментальные данные по температуре внешней поверхности металлической части корпуса турбины, путем решения обратной задачи теплопроводности определены коэффициенты теплоотдачи на внутренней (со стороны пара) поверхности корпуса. Используя полученное решение и найденные коэффициенты теплоотдачи, определено температурное состояние корпуса турбины в различных его сечениях. На основе полученных температур, используя метод конечных элементов, найдены температурные напряжения в наиболее теплонапряженных элементах корпуса.

Ключевые слова: цилиндр высокого давления, экспериментальное исследование температуры, задача теплопроводности, аналитическое решение, обратная задача теплопроводности.

STUDY OF THERMOSTRESSED CONDITION CYLINDER OF HIGH PRESSURE OF STEAM TURBINE T – 100 – 130

Kudinov V. A.^{а,1}, Kurganova O. Yu.^{а,2}, Gavrilova T. E.^{а,3}, Stefanyuk E. V.^{а,4}, Kudinov I. V.^{а,5}

^а Federal state educational institution of higher professional education «Samara State Technical University», Samara, 443100, Russia

The results of experimental and theoretical studies of the temperature and the thermostressed state of the high-pressure cylinder (HPC) housing of the steam turbine T-100-130 in the launch mode are presented. Using the method of L.V. Kantorovich, an approximate analytical solution of the problem of thermal conductivity for a two-layer wall of a turbine (metal housing - thermal insulation) is obtained for inhomogeneous boundary conditions of the third kind. On the basis of the obtained analytical solution, using the experimental data on the temperature of the outer surface of the metallic part of the turbine housing, the heat transfer coefficients on the inner (steam side) surface of the hull are determined by solving the inverse heat conduction problem. Using the solution obtained and the heat transfer coefficients found, the temperature state of the turbine casing in its various sections is determined. Based on the temperatures obtained, using the method of finite elements, the temperature stresses in the most heat-stressed case elements are found.

Keywords: high-pressure cylinder, experimental temperature study, heat conduction problem, analytical solution, inverse heat conduction problem.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00029 мол_а.

¹ E-mail: kud-samgtu@yandex.ru

² E-mail: o.y.kurganova@gmail.com

³ E-mail: totig@yandex.ru

⁴ E-mail: stef-kate@yandex.ru

⁵ E-mail: igor-kudinov@bk.ru

PACS: 02.30.Zz, 02.60.Lj
 DOI: 10.17238/issn2226-8812.2018.3.78-91

При пусках паровых турбин могут возникать проблемы, связанные со значительным перепадом температур между верхней и нижней частью корпуса, между его фланцами и шпильками, с разностью удлинений вала и корпуса турбины и проч. В случаях, когда перепады температур и разности удлинений превышают установленные инструкциями по запуску предельно допустимые значения, процесс пуска необходимо прекращать. Эти проблемы наиболее характерны для ЦВД, как работающего при более высоких температурах по сравнению с другими цилиндрами турбины. На корпусе ЦВД турбины Т – 100 – 130 предусмотрено шесть штатных термопар, размещенных в пятом сечении (рис. 1) – по одной термопаре сверху, снизу, двух фланцах и двух шпильках. Для расчетов распределения температур и напряжений по длине корпуса информация, полученная от такого количества термопар недостаточна. Для получения более подробной информации были выполнены работы по термометрированию внешней поверхности корпуса и исследованию его температурного состояния в режимах запуска и останова. В частности, были установлены термопары в семи сечениях (с первого С – 1 по седьмое С – 7 сечения), включая сечение со штатными термопарами (участки между сечениями пронумерованы римскими цифрами). Схема размещения термопар представлена на рис. 1. В сечении 1 размещены три термопары: 1:1 – левый фланец, 1:2 – верх, 1:3 – правый фланец. В сечениях 2, 3, 4 – по одной термопаре: 2:1, 3:1, 4:1 в верхней части корпуса. В сечении 5 (штатное сечение) – 6 термопар: 5:1 – левый фланец; 5:2 – верх; 5:3 – правый фланец; 5:4 – левая шпилька; 5:5 – правая шпилька; 5:6 – низ. В шестом сечении – одна термопара: 6:1 – верх. В седьмом сечении – три термопары: 7:1 – левый фланец; 7:2 – верх; 7:3 – правый фланец.

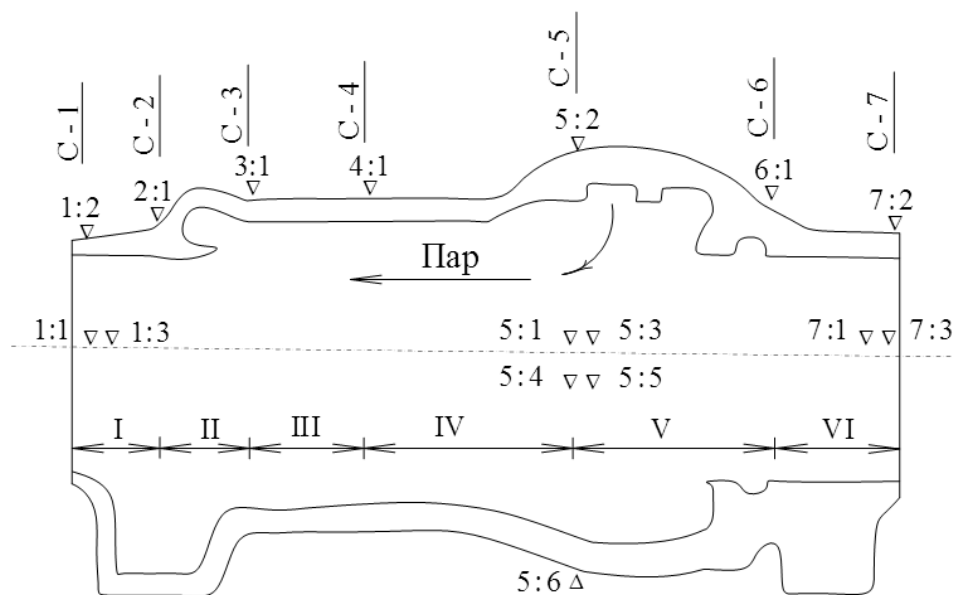


Рис. 1. Схема размещения термопар в сечениях ЦВД. С – 1, С – 2, С – 3, ..., С – 7 – сечения; 1:1, 2:1, 3:1, ..., 7:3 – термопары.

Термопары были установлены с целью включения их в информационно-диагностическую систему турбогенератора Т-100-130 Самарской ТЭЦ. Система предназначена для автоматизированного сбора и отображения информации с использованием персональных компьютеров. К числу такой информации относятся: температура корпуса турбины и вала; давление и расход пара; удлинение корпуса и вала; число оборотов вала турбины; показатели вибрации и прочее.

Результаты экспериментальных исследований температурного состояния корпуса ЦВД тур-

бины в режиме пуска представлены на рис. 2. Из их анализа следует, что наиболее интенсивно прогреваются участки II – V. Минимальная температура в процессе пуска наблюдается в сечениях С – 1 и С – 7, то есть в той части корпуса, где находятся лабиринтовые уплотнения и скорости течения пара незначительны.

Экспериментальные значения температур были использованы для определения коэффициентов теплоотдачи, наблюдающихся при передаче теплоты от пара к корпусу, которые находились из решения обратной задачи теплопроводности. Сначала было найдено решение прямой задачи для двухслойной стенки (металлический корпус турбины – тепловая изоляция) в следующей математической постановке (рис. 3) [1, 2]:

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

$$T_i(x, 0) = T_0, \quad (i = 1, 2) \quad (2) \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1(0, t)}{\partial x} + \alpha_1 [T_{cp1} - T_1(0, t)] = 0; \quad (3)$$

$$T_1(x_1, t) = T_2(x_1, t); \quad (4) \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1(x_1, t)}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(x_1, t)}{\partial x}; \quad (5)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2(\delta, t)}{\partial x} + \alpha_2 [T_2(\delta, t) - T_{cp2}] = 0, \quad (6)$$

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 – коэффициенты теплопроводности и температуропроводности i -го слоя ($i = 1, 2$); T_0 – начальная температура; α_1 – коэффициент теплоотдачи со стороны пара; α_2 – коэффициент теплоотдачи со стороны окружающей среды; T_{cp1} – температура пара; T_{cp2} – температура окружающей среды.

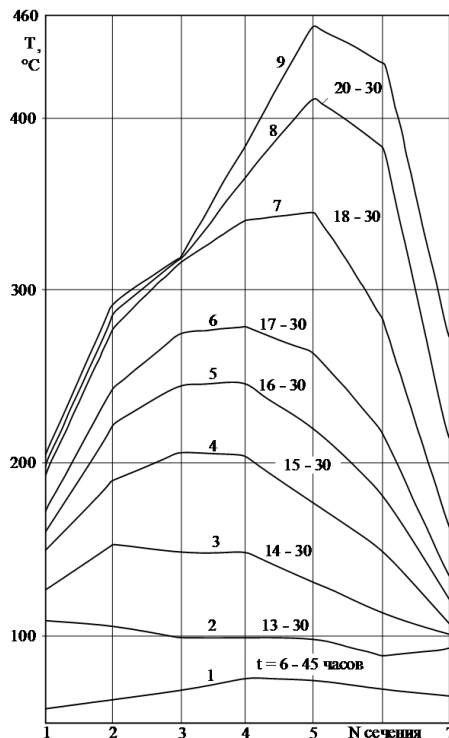


Рис. 2. Распределение температуры в верхней части ЦВД в процессе запуска (кривые 1 – 8); 9 – стационарное состояние; t – время.

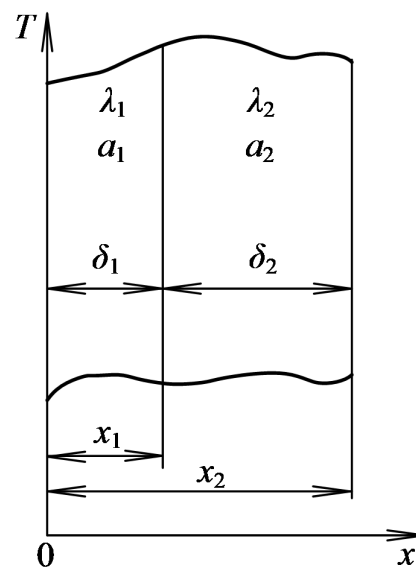


Рис. 3. Схема двухслойной конструкции.

Введем следующие безразмерные переменные и параметры:

$$\Theta_i = \frac{(T_i - T_{cp2})}{(T_0 - T_{cp2})}; \quad \xi = \frac{x}{\delta}; \quad Fo = \frac{at}{\delta^2}; \quad Bi_1 = \frac{\alpha_1 \delta}{\lambda_1}; \quad Bi_2 = \frac{\alpha_2 \delta}{\lambda_2}; \quad \Delta T = \frac{(T_{cp1} - T_{cp2})}{(T_0 - T_{cp2})},$$

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

С учетом введенных обозначений задача (1) – (6) принимает вид

$$\frac{\partial \Theta(\xi, Fo)}{\partial Fo} = \frac{a_i}{a} \frac{\partial^2 \Theta(\xi, Fo)}{\partial \xi^2}, \quad (Fo > 0; \quad \xi_{i-1} < \xi < \xi_i; \quad i = 1, 2; \quad \xi_0 = 0; \quad \xi_2 = 1); \quad (7)$$

$$\Theta_i(\xi, 0) = 1, \quad (i = 1, 2); \quad (8) \quad \frac{\partial \Theta_1(0, Fo)}{\partial \xi} + Bi_1[\Delta T - \Theta_1(0, Fo)] = 0; \quad (9)$$

$$\Theta_1(\xi_1, Fo) = \Theta_2(\xi_1, Fo); \quad (10) \quad \lambda_1 \frac{\partial \Theta_1(\xi_1, Fo)}{\partial \xi} = \lambda_2 \frac{\partial \Theta_2(\xi_1, Fo)}{\partial \xi}; \quad (11)$$

$$\frac{\partial \Theta_2(1, Fo)}{\partial \xi} + Bi_2 \Theta_2(1, Fo) = 0, \quad (12)$$

где соотношения (10), (11) представляют условия сопряжения, записанные в виде равенства температур и тепловых потоков в точке контакта слоев $\xi = \xi_1$.

Решение задачи (7) – (12) принимается в виде

$$\Theta_i(\xi, Fo) = \Phi_i(\xi) + \eta_i(\xi, Fo), \quad (i = 1, 2), \quad (13)$$

где функция $\Phi_i(\xi)$ является решением стационарной задачи с неоднородными граничными условиями, а функция $\eta_i(\xi, Fo)$ – решением нестационарной задачи с однородными граничными условиями.

Математическая постановка задачи для функции $\Phi_i(\xi)$ имеет вид

$$\frac{d^2 \Phi_i(\xi)}{d\xi^2} = 0, \quad (\xi_{i-1} < \xi < \xi_i; \quad i = 1, 2; \quad \xi_0 = 0; \quad \xi_2 = 1); \quad (14)$$

$$\frac{d\Phi_1(0)}{d\xi} + Bi_1[\Delta T - \Phi_1(0)] = 0; \quad (15) \quad \Phi_1(\xi_1) = \Phi_2(\xi_1); \quad (16)$$

$$\lambda_1 \frac{d\Phi_1(\xi_1)}{d\xi} = \lambda_2 \frac{d\Phi_2(\xi_1)}{d\xi}; \quad (17) \quad \frac{d\Phi_2(1)}{d\xi} + Bi_2 \Phi_2(1) = 0. \quad (18)$$

Решение задачи (14) – (18) принимается в виде

$$\Phi_i(\xi) = A_i + D_i \xi, \quad (i = 1, 2), \quad (19)$$

где A_i, D_i – неизвестные коэффициенты.

Очевидно, что соотношение (19) удовлетворяет уравнению (14). Неизвестные $A_i, D_i, (i = 1, 2)$ находятся из граничных условий (15) – (18). Подставляя (19) в (15) – (18), для их определения будем иметь систему четырех алгебраических линейных уравнений, из решения которой находим

$$\begin{aligned} A_1 &= Bi_1 \Delta T (Bi_2 \xi_1 (\lambda_2 - \lambda_1) + \lambda_1 (1 + Bi_2)) / r; & A_2 &= Bi_1 \Delta T \lambda_1 (1 + Bi_2) / r \\ D_1 &= -Bi_1 \Delta T Bi_2 (\lambda_2 / r); & D_2 &= -\lambda_1 Bi_1 \Delta T (Bi_2 / r), \end{aligned} \quad (20)$$

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

Математическая постановка задачи для функции $\eta_i(\xi, Fo)$ имеет вид

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

$$\eta_i(\xi, 0) = 1; \quad (i = 1, 2) \quad (22) \quad \frac{\partial \eta_1(0, Fo)}{\partial \xi} - Bi_1 \eta_1(0, Fo) = 0; \quad (23)$$

$$\eta_1(\xi_1, Fo) = \eta_2(\xi_1, Fo); \quad (24) \quad \lambda_1 \frac{\partial \eta_1(\xi_1, Fo)}{\partial \xi} = \lambda_2 \frac{\partial \eta_2(\xi_1, Fo)}{\partial \xi}; \quad (25)$$

$$\frac{\partial \eta_2(1, Fo)}{\partial \xi} + Bi_2 \eta_2(1, Fo) = 0. \quad (26)$$

Решение задачи (21) – (26), следуя методу Л.В. Канторовича, принимается в виде

$$\eta_i(\xi, Fo) = f(Fo) \varphi_i(\xi), \quad (i = 1, 2), \quad (27)$$

где $f(Fo)$ – неизвестная функция времени; $\varphi_i(\xi)$ – координатные функции ($i = 1, 2$), определяемые так, чтобы решение (27) удовлетворяло граничным условиям (23), (26) и условиям сопряжения (24), (25).

Сначала находится координатная функция для второго слоя, которая принимается в виде

$$\varphi_2(\xi) = R - \xi^2, \quad (28)$$

где R – неизвестная постоянная, определяемая из граничного условия (26). Подставляя (27) (с учетом (28)) в (26), относительно неизвестной R будем иметь алгебраическое уравнение, из решения которого находим $R = (Bi_2 + 2)/Bi_2$. Учитывая найденное R , соотношение (28) будет

$$\varphi_2(\xi) = (Bi_2 + 2)/Bi_2 - \xi^2. \quad (29)$$

Координатная функция для первого слоя принимается в виде

$$\varphi_1(\xi) = F + F_1 \xi + F_2 \xi^2, \quad (30)$$

где F, F_1, F_2 – неизвестные постоянные, определяемые из граничного условия (23) и условий сопряжения (24), (25).

Подставляя (27) (с учетом (29)) в (23)–(25), относительно F, F_1, F_2 будем иметь систему трех алгебраических уравнений, из решения которой находим

$$F = 2r_2/r_1; \quad F_1 = Bi_1 F; \quad F_2 = -(2\lambda_2 \xi_1 + Bi_1 \lambda_1 N + Bi_1 \xi_1^2 (2\lambda_2 - \lambda_1)) / (r_1 \xi_1), \quad (31)$$

где $r_1 = \lambda_1(2 + Bi_1 \xi_1)$; $r_2 = \lambda_1 N - \xi_1^2(\lambda_1 - \lambda_2)$; $N = (Bi_2 + 2)/Bi_2$.

Подставляя найденные значения F, F_1, F_2 в (30), получаем

$$\varphi_1(\xi) = 2r_2/r_1 + Bi_1 F \xi - \xi^2 (2\lambda_2 \xi_1 + Bi_1 \lambda_1 N + Bi_1 \xi_1^2 (2\lambda_2 - \lambda_1)) / (r_1 \xi_1). \quad (32)$$

Соотношение (27) с учетом найденных соотношений для координатных функций $\varphi_1(\xi)$ и $\varphi_2(\xi)$ точно удовлетворяет условиям (23) – (26). Для определения неизвестной функции времени $f(Fo)$ потребуем, чтобы соотношение (27) удовлетворяло не уравнению (21), а некоторому осредненному уравнению, то есть интегралу теплового баланса

$$\int_0^{\xi_1} \left(\frac{\partial \eta_1(\xi, Fo)}{\partial Fo} - \frac{a_1}{a} \frac{\partial^2 \eta_1(\xi, Fo)}{\partial \xi^2} \right) d\xi + \int_{\xi_1}^1 \left(\frac{\partial \eta_2(\xi, Fo)}{\partial Fo} - \frac{a_2}{a} \frac{\partial^2 \eta_2(\xi, Fo)}{\partial \xi^2} \right) d\xi = 0. \quad (33)$$

Подставляя (27) в (33), находим

$$\int_0^{\xi_1} \left(\frac{df}{dFo} \varphi_1 - \frac{a_1}{a} f \frac{d^2 \varphi_1}{d\xi^2} \right) d\xi + \int_{\xi_1}^1 \left(\frac{df}{dFo} \varphi_2 - \frac{a_2}{a} f \frac{d^2 \varphi_2}{d\xi^2} \right) d\xi = 0. \quad (34)$$

Определяя интегралы в (34), относительно неизвестной функции $f(\text{Fo})$ получаем следующее обыкновенное дифференциальное уравнение

$$\mu_1 \frac{df}{d\text{Fo}} + \mu_2 f = 0, \tag{35}$$

где $\mu_1 = (2\xi_1 \lambda_1 \text{Bi}_2 (3 + 3\xi_1^2 - \xi_1 \text{Bi}_1 - \xi_1^3 \text{Bi}_1) + 12\xi_1 \lambda_1 + 4\xi_1^3 \lambda_2 \text{Bi}_2 + 4\xi_1^2 \text{Bi}_1 \lambda_1) / (3\mu_3) + (2 - 3\xi_1 + \xi_1^3) / 3 + 2(1 - \xi_1) / \text{Bi}_2$; $\mu_2 = (4a_1 \text{Bi}_2 \xi_1 \lambda_2 (1 + \xi_1 \text{Bi}_1) + 2a_1 \text{Bi}_1 \lambda_1 \text{Bi}_2 (1 - \xi_1^2) + 2a_1 \lambda_1 \text{Bi}_1) / (a\mu_3) + 2a_2(1 - \xi_1) / a$; $\mu_3 = \text{Bi}_2 \lambda_1 (2 + \xi_1 \text{Bi}_1)$.

Интегрируя уравнение (35), получаем

$$f(\text{Fo}) = C_1 \exp\left(-\frac{6(\mu_4 + \mu_5 + \mu_8 + 2\text{Bi}_2 a_2 \lambda_1 (\xi_1 - 1) - 2\text{Bi}_1 a_1 \lambda_1)}{\mu_6 + \text{Bi}_2 \xi_1^2 \lambda_1 (\text{Bi}_1 + \xi_1) - 4\text{Bi}_2 \xi_1^3 \lambda_2 + \mu_9 - \mu_7} \text{Fo}\right), \tag{36}$$

где C_1 - константа интегрирования; $\mu_4 = \text{Bi}_1 \text{Bi}_2 \xi_1^2 a_1 (\lambda_1 - \lambda_2)$; $\mu_5 = \text{Bi}_1 \text{Bi}_2 \xi_1 a_2 \lambda_1 (\xi_1 - 1)$; $\mu_6 = \text{Bi}_1 \text{Bi}_2 \xi_1^4 (\lambda_1 - \lambda_2)$; $\mu_7 = \lambda_1 (6\text{Bi}_1 \xi_1 - 4\text{Bi}_1 - 12)$; $\mu_8 = \text{Bi}_1 \text{Bi}_2 a_1 (\lambda_1 - 2\lambda_2)$; $\mu_9 = 2\text{Bi}_1 \xi_1 \lambda_1 (\xi_1 - \text{Bi}_2)$.

Подставляя (19), (27) в (13), находим

$$\Theta_i(\xi, \text{Fo}) = A_i + D_i \xi + f(\text{Fo}) \varphi_i(\xi), \quad (i = 1, 2). \tag{37}$$

Для определения константы интегрирования C_1 используется начальное условие (8). Составляя интеграл его невязки, находим

$$\int_0^{\xi_1} (\Theta_1(\xi, 0) - 1) d\xi + \int_{\xi_1}^1 (\Theta_2(\xi, 0) - 1) d\xi = 0. \tag{38}$$

Подставляя (37) в (38), получаем

$$\int_0^1 ((A_1 + D_1 \xi) + f(0) \varphi_1(\xi)) d\xi + \int_{\xi_1}^1 ((A_2 + D_2 \xi) - f(0) \varphi_2(\xi)) d\xi = 0. \tag{39}$$

Определяя интегралы в (39), относительно константы интегрирования C_1 будем иметь алгебраическое линейное уравнение, из решения которого находим

$$C_1 = \frac{3}{2} \frac{(r_3 - r_4 - \text{Bi}_1 \Delta T \lambda_1 (2 + \text{Bi}_2) + 2\text{Bi}_1 \lambda_1 (\text{Bi}_2 + 1) - 2\lambda_2 \text{Bi}_2) (2 + \xi_1 \text{Bi}_1) \lambda_1 \text{Bi}_2}{(r_5 - \lambda_1 \text{Bi}_1 - \lambda_2 \text{Bi}_2 - \lambda_1 \text{Bi}_1 \text{Bi}_2) (r_6 + r_7 + r_8 + 12\lambda_1 - 6\xi_1 \text{Bi}_1 \lambda_1)},$$

где $r_3 = \text{Bi}_1 \text{Bi}_2 \Delta T \xi_1 (\lambda_2 - \lambda_1)$; $r_4 = 2\text{Bi}_1 \text{Bi}_2 \xi_1 (\lambda_1 - \lambda_2)$; $r_5 = \xi \text{Bi}_1 \text{Bi}_2 (\lambda_1 - \lambda_2)$; $r_6 = 4\xi_1^3 \text{Bi}_2 (\lambda_1 - \lambda_2)$; $r_7 = \lambda_1 \text{Bi}_1 \text{Bi}_2 \xi_1 (\xi_1 + \xi_1^3 - 2)$; $r_8 = \xi_1^2 \text{Bi}_1 (2\lambda_1 - \xi_1^2 \lambda_2 \text{Bi}_2)$.

После определения константы интегрирования решение задачи (7) - (12) находится из (37).

Соотношение (37) точно удовлетворяет граничным условиям (9), (12) условиям сопряжения (10), (1) и приближенно (в первом приближении) - уравнению (7) и начальному условию (8). Если положить $\lambda_1 = \lambda_2$; $a_1 = a_2$; $\text{Bi}_1 = 0$; $\text{Bi}_2 = 10000$, то соотношение (37) приводится к решению задачи для однослойной пластины при симметричных граничных условиях первого рода (ввиду большой величины Bi_2 при $\xi = 1$ температура стенки принимает температуру среды).

$$\Theta(\xi, \text{Fo}) = 1, 5 \exp(-3\text{Fo})(1 - \xi^2). \tag{40}$$

Анализ решения (40) позволяет заключить, что в диапазоне числа $0 < \text{Fo} < 0,1$ его отличие от точного решения [3] не превышает 4%.

На рис. 4 приведены кривые изменения температуры во времени в верхней части всех сечений, полученные на основе данных рис. 1, то есть даны показания термопар 1:2, 2:1, 3:1, 4:1, 5:2, 6:1, 7:2 соответственно с первого по седьмое сечения. Их анализ позволяет заключить, что в диапазоне

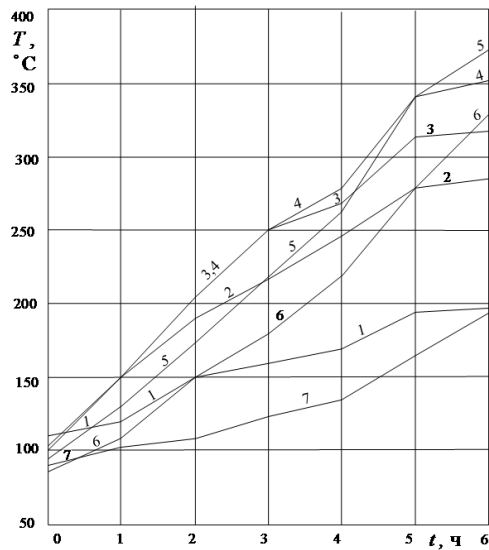


Рис. 4. Изменение температуры во времени в верхней части корпуса турбины. 1 – 7 – номера сечений (см. рис. 1).

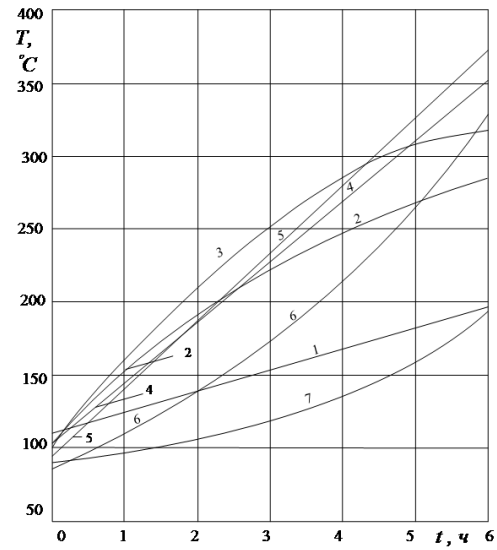


Рис. 5. Результаты аппроксимации температуры (см. рис. 4) по формулам (41).

времени запуска от 13 – 30 до 20 – 30 часов эти можно приближенно аппроксимировать линейной зависимостью от времени (кривые 1, 4, 5) и квадратичной (кривые 2, 3, 6, 7)

$$T(t) = \nu_1 + \nu_2 t; \quad T(t) = \nu_1 + \nu_2 t + \nu_3 t^2, \quad (41)$$

где ν_1, ν_2, ν_3 – коэффициенты аппроксимации. Их значения для каждой кривой даны в таблице 1. Кривые, полученные по формулам (41), даны на рис. 5.

Соотношения (41) путем решения обратной задачи теплопроводности были использованы для определения коэффициентов теплоотдачи (α_1) на внутренней поверхности стенки турбины [4]. Применительно к задаче (4) – (9) формулами (41) определяется температура в точке контакта слоев $x = x_1$, то есть $T(x, t) = T(x_1, t)$.

Подставляя соотношения (41), представленные в безразмерном виде, в левую часть решения (37), относительно $Bi_1 = \alpha_1 \delta / \lambda_1$ для каждого сечения получаем трансцендентное уравнение, из решения которого находим Bi_1 , а, следовательно, и коэффициент теплоотдачи α_1 . Используя решение (37) и соотношения (41), были найдены средние за время запуска коэффициенты теплоотдачи со стороны пара в тех точках верхней части корпуса ЦВД, где были установлены термопары. Их величины соответственно со второго по седьмое сечения оказались следующими: 12, 20, 36, 35, 11 Вт/(м² · К). Анализ полученных результатов позволяет заключить, что наименьшая величина α_1 наблюдается в тех сечениях, где находятся лабиринтовые уплотнения, в пространстве между которыми скорости движения пара невелики (застойные зоны). Максимальные α_1 имеют место там, где наблюдаются высокие значения температур и скоростей течения пара.

Найденные значения коэффициентов теплоотдачи позволили определить распределение температуры по толщине стенки и тепловой изоляции для сечений 1, 2, 4, 5. Результаты расчетов по формуле (37) (представленной в размерном виде) приведены на графиках рис. 6. Их анализ позволяет заключить, что наибольший перепад температуры по толщине стенки, составляющий 8,2°C, наблюдается в пятом сечении, то есть там, где толщина стенки максимальная ($\delta_1 = 0,08$ м).

Исходные данные для решения задачи были следующие:

$\lambda_1 = 37$ Вт/(м · К); $\lambda_2 = 0,8$ Вт/(м · К); $a_1 = 0,8 \cdot 10^{-5}$ м²/с; $a_2 = 0,8 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\delta_2 = 0,3$ м; $\alpha_2 = 10$ Вт/(м² · К); $t_{cp} = 30$ °С.

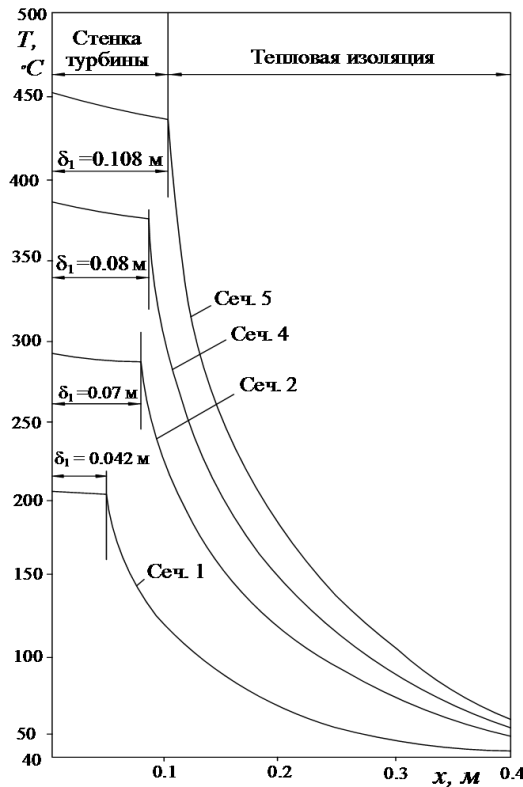


Рис. 6. Графики изменения температуры по толщине двухслойной (металл – тепловая изоляция) стенки ЦВД турбины в различных сечениях по длине корпуса (см. рис. 2).

Таблица 1. Коэффициенты аппроксимации экспериментальных значений температуры.

Коэффициенты аппроксимации	Номер сечения корпуса турбины (см. рис. 1)						
	1	2	3	4	5	6	7
ν_1	110	105	100	100	94	85	90
ν_2	14	44.83	63.33	42.17	46.7	23.17	4.37
ν_3		- 2.5	- 4.44			2.83	2.1

Отметим, что толщина металлической части стенки в разных сечениях корпуса была разной и, в частности, сечение 1: $\delta_1 = 0,042 \text{ м}$; сечение 2: $\delta_1 = 0,07 \text{ м}$; сечение 4: $\delta_1 = 0,08 \text{ м}$; сечение 5: $\delta_1 = 0,108 \text{ м}$ (рис. 6).

Результаты экспериментальных исследований температурного состояния корпуса ЦВД турбины Т-100-130, приведенные на рис. 2, были использованы для расчетов температурных напряжений и перемещений. Для этого использовался метод конечных элементов [5].

Математическая постановка задачи термоупругости имеет вид

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = 0; \quad (42) \quad \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} \quad (43)$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu \sigma_y) + \alpha_T T; \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu \sigma_x) + \alpha_T T; \quad \gamma_{xy} = \frac{2(1 + \nu)}{E} \tau_{xy}; \quad (44)$$

$$\varepsilon_x = \partial U / \partial x; \quad \varepsilon_y = \partial V / \partial y; \quad \gamma_{xy} = \partial V / \partial x + \partial U / \partial y, \quad (45)$$

где σ_x, σ_y – нормальные напряжения; τ_{xy} – касательное напряжение; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ – деформации; $U,$

V – перемещения; α_T – коэффициент линейного расширения; E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона, x, y – координаты.

Граничные условия задаются в виде отсутствия напряжений на границе в направлении, перпендикулярном касательной в данной точке. Также, задается условие отсутствия перемещений какой-либо точки по всем координатным осям (чтобы исключить движение тела как целого) и отсутствие перемещений в какой-либо другой точке по одной из координат (для исключения вращения тела).

Схема автоматического разбиения поперечного сечения ЦВД турбины представлена на рис. 7. Автоматическое разбиение выполнялось лишь по предварительной информации о координатах x, y граничных точек области. В результате разбиения получены 123 узловые точки и 160 треугольных элементов.

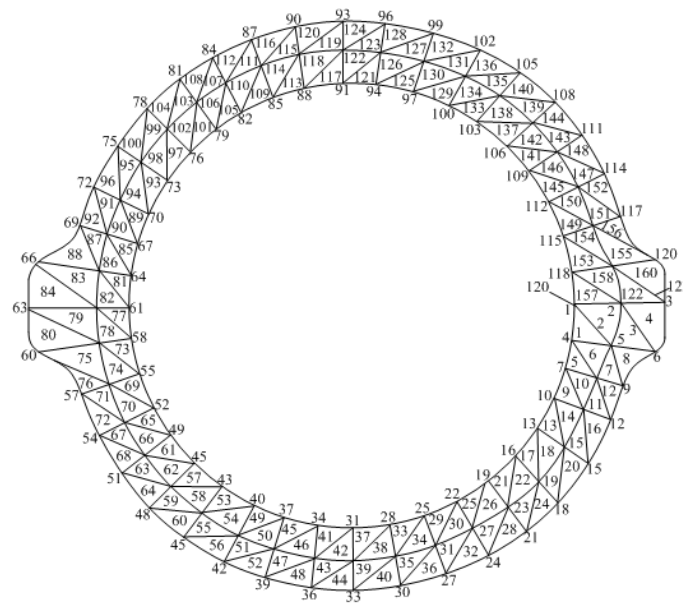


Рис. 7. Схема автоматического разбиения области на треугольные элементы. Число узловых точек – 123; число элементов – 160.

Температурное поле в сечении турбины (пятое сечение, см. рис. 2) и результаты расчета перемещений представлены на рис. 8. Анализируя температурное поле, наблюдавшееся в 15 – 45 часов запуска, (см. рис. 2) можно заметить значительную разность температур между верхом-низом и фланцами (до $80^\circ C$). В то же время температуры верха и низа практически совпадают. Незначительно отличаются также и температуры фланцев ($\Delta t = 2^\circ C$).

Проведем анализ температурных перемещений корпуса. Так как температурное поле практически симметрично относительно верха и низа и фланцев, то поле перемещений также оказывается практически симметричным (см. рис. 8). Однако ввиду существенной разницы температур между верхом-низом и фланцами, в зоне больших температур (на фланцах) перемещения оказываются большими (до 0,9 мм), в связи с чем, на фланцах образуются вздутия корпуса. Подобная несимметрия деформации корпуса может приводить к аварийным ситуациям (раскрытия корпуса в области фланцев, задевания венца лопаток о корпус, появление трещин на корпусе и проч.).

На рис. 9 представлены результаты расчетов температурных напряжений σ_x . Их анализ позволяет заключить, что уровень напряжений относительно невысок (не более 8 кг/мм^2). Причем на внутренней поверхности, как более нагретой, развиваются напряжения сжатия, а на внешней растяжения.

В пределах отдельных участков корпус ЦВД, пренебрегая фланцами, можно приближенно представить как полый цилиндр, а температурное поле считать осесимметричным. В этом случае

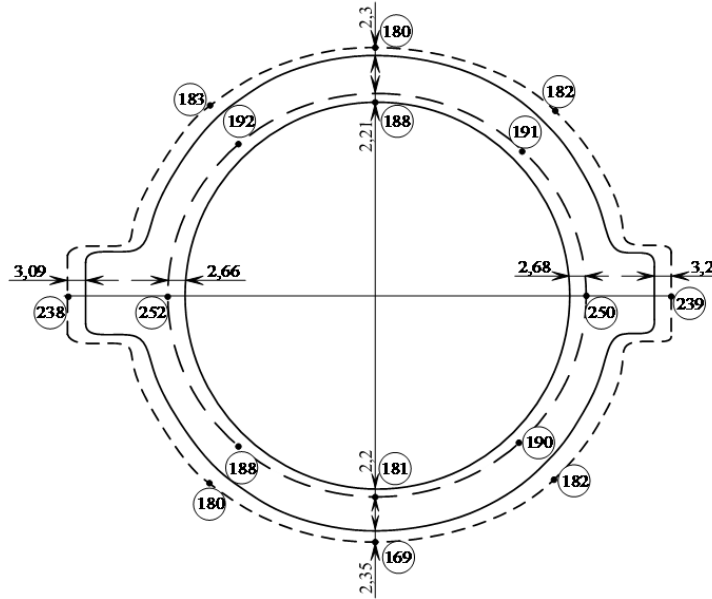


Рис. 8. Деформация сечения корпуса от действия температурных сил в режиме пуска. Сплошные линии – размеры сечения в ненагретом состоянии турбины. Штриховые линии – деформация сечения от температурного расширения. Цифры на стрелках – удлинения корпуса в мм. Цифры, обведенные кругом, – температуры в °С.

для расчета температурных напряжений применяются следующие формулы [6]

$$\sigma_r = \frac{\alpha E}{1 - \nu} \frac{1}{r^2} \left(\frac{r^2 - r_B^2}{r_H^2 - r_B^2} \int_{r_b}^{r_H} T r dr - \int_{r_b}^r T r dr \right); \tag{46}$$

$$\sigma_\Theta = \frac{\alpha E}{1 - \nu} \frac{1}{r^2} \left(\frac{r^2 - r_B^2}{r_H^2 - r_B^2} \int_{r_b}^{r_H} T r dr + \int_{r_b}^r T r dr - T r^2 \right); \tag{47}$$

$$\sigma_z = \frac{\alpha E}{1 - \nu} \left(\frac{2}{r_H^2 - r_B^2} \int_{r_b}^r T r dr - T \right), \tag{48}$$

где $\sigma_r, \sigma_\Theta, \sigma_z$ – соответственно радиальное, окружное и осевое напряжения; r_b, r_H – соответственно внутренний и наружный радиусы полого цилиндра.

Температура T принималась по толщине стенки в виде следующей линейной функции

$$T = A_1 + A_2 r,$$

где A_1, A_2 – коэффициенты аппроксимации, определяемые на основе экспериментальных и расчетных данных по температуре на внутренней и внешней поверхностях стенки.

Из физических соображений и, как это следует из формулы (46), радиальные температурные напряжения σ_r при $r = r_b$ и $r = r_H$ равны нулю. Радиальные напряжения внутри стенки не превышают $1 - 3 \text{ кг/мм}^2$. В связи с чем, в дальнейшем их не будем рассматривать. Максимальных значений (до 15 кг/мм^2) напряжения σ_Θ достигают на внутренней поверхности стенки (напряжения сжатия). По толщине стенки напряжения меняют свой знак и на внешней поверхности наблюдаются окружные напряжения растяжения до 7 кг/мм^2 (см. рис. 9).

Сравнивая результаты этих расчетов с результатами, полученными с помощью метода конечных элементов (см. рис. 9), можно заметить, что в верхней и нижней части сечения напряжения σ_Θ незначительно отличаются от напряжения σ_x . Отметим, что напряжения σ_x в этих областях, при расчетах методом конечных элементов по сути, являются окружными напряжениями.

Осевые напряжения σ_z также изменяют свой знак в пределах толщины стенки от -12 кг/мм^2 на внутренней поверхности до $+4 \text{ кг/мм}^2$ на внешней поверхности (см. рис. 10).

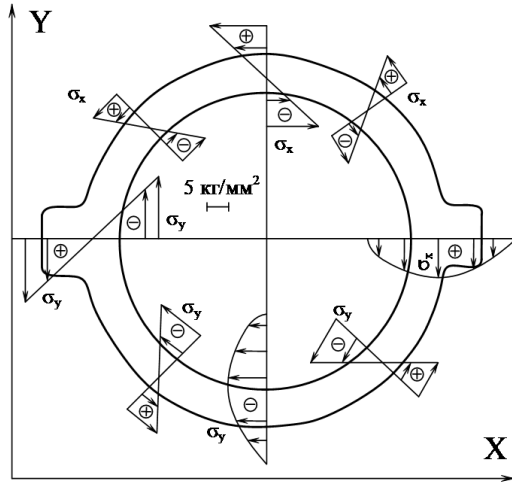


Рис. 9. Эпюры распределения напряжений σ_x в плоскости поперечного сечения корпуса турбины Т-100-130 в режиме запуска. \oplus – растяжение; \ominus – сжатие. Температурное поле представлено на рис. 8.

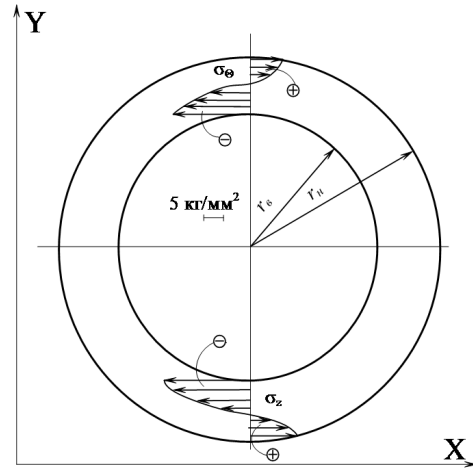


Рис. 10. Эпюры распределения окружных σ_θ и осевых σ_z температурных напряжений в сечении корпуса ЦВД турбины Т-100-130. \oplus – растяжение; \ominus – сжатие.

Кроме температурных сил, на материал корпуса действуют еще силы давления пара (130 атм.), находящегося внутри корпуса. Приводимая далее методика позволяет выполнить расчет напряжений и перемещений цилиндров, находящихся под действием постоянных по длине наружным и внутренним давлением [8]. По формулам этой методики можно выполнять расчет и тогда, когда давление распределено только на части длины или, когда концы цилиндра закреплены. В данном случае напряжения можно определять лишь в сечениях, достаточно удаленных от торцов.

Применительно к корпусу турбины приводимые ниже формулы будут справедливы лишь для центральной ее части. Вследствие осевой симметрии нагрузки, напряжения и деформации будут симметричны относительно оси цилиндра и постоянны по его длине.

Формулы для определения напряжений имеют вид [7]

$$\sigma'_\theta = \frac{P_B r_B^2 - P_H r_H^2}{r_H^2 - r_B^2} + \frac{(P_B - P_H) r_b^2 r_n^2}{(r_H^2 - r_B^2) \rho^2}; \quad (49) \quad \sigma'_r = \frac{P_B r_B^2 - P_H r_H^2}{r_H^2 - r_B^2} - \frac{(P_B - P_H) r_b^2 r_n^2}{(r_H^2 - r_B^2) \rho^2}; \quad (50)$$

$$\sigma'_z = \frac{P_B r_B^2 - P_H r_H^2}{r_H^2 - r_B^2}, \quad (51)$$

где σ'_r – нормальное радиальное напряжение; σ'_θ – окружное тангенциальное напряжение; σ'_z – осевое напряжение; P_B , P_H – внутреннее и наружное давление; r_B , r_H – внутренний и наружный радиусы; ρ – текущий радиус (рис. 10).

Исходные данные для расчета:

$$P_B = 130 \text{ кг/см}^2; P_H = 1 \text{ кг/см}^2; r_B = 633 \text{ мм}; r_H = 710 \text{ мм}; \mu = 0,3; E = 18000 \text{ кг/мм}^2.$$

Радиальные напряжения σ'_r внутри и снаружи принимают соответственно значения $\sigma'_{r_B} = -130 \text{ кг/см}^2 = -1,3 \text{ кг/мм}^2$; $\sigma'_{r_H} = -1 \text{ кг/см}^2 = 0,01 \text{ кг/мм}^2$. Таким образом, найденные по формуле (50) напряжения на внутренней и внешней поверхностях, совпадают с заданными на этих поверхностях давлениями. Знаки напряжений отрицательные (сжатие).

Окружное напряжение σ'_θ , найденное по соотношению (49), для внутренней и наружной поверхности цилиндра принимает следующие значения $\sigma'_{\theta_B} = 10,6 \text{ кг/мм}^2$; $\sigma'_{\theta_H} = 8,9 \text{ кг/мм}^2$. Знаки напряжений положительные (растяжение). Графики распределения напряжений, найденных по

формулам (49), (51), а также суммарных напряжений, возникающих от сил давления пара и температурных сил, приведены на рис. 11.

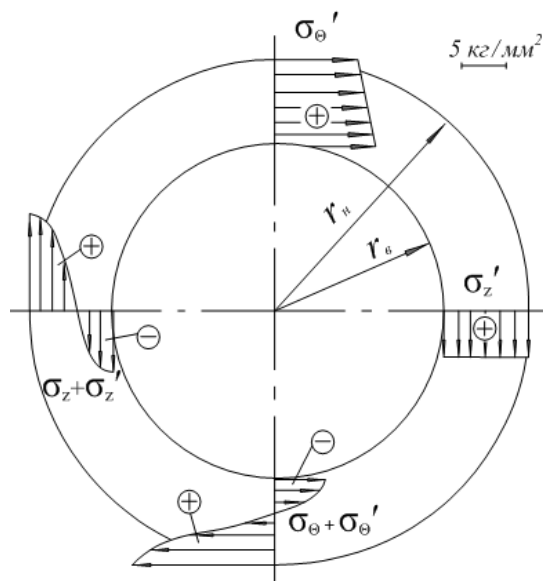


Рис. 11. Эпюры распределения напряжения σ'_θ , σ'_z , возникающие от сил давления пара, и суммарных напряжений (температурных и от сил давления пара), $\sigma_\theta + \sigma'_\theta$, $\sigma_z + \sigma'_z$.

Осевое напряжение $\sigma'_z=4,98 \text{ кг/мм}^2$, найденное по формуле (51), имеет одинаковое значение по толщине стенки цилиндра и оказывается положительным (растяжение).

Анализируя полученные результаты, заключаем, что на внутренней поверхности корпуса окружные напряжения σ'_θ от температурных сил и сил давления пара, незначительно отличаясь по абсолютной величине, имеют противоположные знаки. Таким образом, внутренняя поверхность оказывается практически разгруженной от окружных напряжений. Знаки окружных температурных напряжений и напряжений от сил давления пара на внешней поверхности корпуса оказываются одинаковыми и, следовательно, они суммируются. В результате суммарные окружные напряжения растяжения на внешней поверхности достигают порядка $17,6 \text{ кг/мм}^2$.

Заключение

1. Используя экспериментально-теоретические исследования температурного состояния корпуса ЦВД турбины Т – 100 – 130 в процессе ее запуска, по известной из эксперимента температуре внешней поверхности металлической части корпуса из решения обратной задачи теплопроводности найдены средние за период запуска коэффициенты теплоотдачи на его внутренней поверхности.
2. 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, которые были использованы для определения температурных напряжений.

Список литературы

1. Кудинов В.А., Карташов Э.М., Калашников В.В. Аналитические решения задач тепломассопереноса и термоупругости для многослойных конструкций. М.: Высшая школа, 2005. 429 с.
2. Кудинов В.А., Аверин Б.В., Стефанюк Е.В. Теплопроводность и термоупругость в многослойных конструкциях. М.: Высшая школа, 2008. 305 с.

3. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
4. Шумаков Н.В. Метод последовательных интервалов в теплотехнике нестационарных процессов. М.: Атомиздат, 1979. 216 с.
5. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир. 1975. 541 с.
6. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1979. 560 с.
7. Рудицин Н.М., Артемов П.Я., Любошиц М.И. Справочное пособие по сопротивлению материалов. Минск: Высшая школа, 1970. 628 с.
8. Неймарк Б.Е. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике. М.: Энергия, 1967. 241 с.

References

1. Kudinov V.A., Kartashov E.M., Kalashnikov V.V. *Analiticheskiye resheniya zadach teplomassoperenosa i termouprugosti dlya mnogosloynnykh konstruksiy*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2005. 429 p. (in Russian).
2. Kudinov V.A., Averin B.V., Stefanyuk E.V. *Teploprovodnost' i termouprugost' v mnogo-sloynnykh konstruksiyakh*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2008. 305 p. (in Russian).
3. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967. 600 p. (in Russian).
4. Shumakov N.V. *Metod posledovatel'nykh intervalov v teplometrii nestatsionarnykh protsessov*. Moscow, Atomizdat Publ., 1979. 216 p. (in Russian).
5. Zenkevich O. *Metod konechnykh elementov v tekhnike*. Moscow, Mir Publ., 1975. 541 p. (in Russian).
6. Timoshenko S.P., Gud'yer Dzh. *Teoriya uprugosti*. Moscow, Nauka Publ., 1979. 560 p. (in Russian).
7. Ruditsin N.M., Artemov P.YA., Lyuboshits M.I. *Spravochnoye posobiye po soprotivleniyu materialov*. Minsk, Vysshaya shkola Publ., 1970. 628 p. (in Russian).
8. Neymark B.Ye. *Fizicheskiye svoystva staley i splavov, primenyayemykh v energetike*. Moscow, Energiya Publ., 1967. 241 p. (in Russian).

Авторы

Кудинов Василий Александрович, д.ф.-м.н., доцент, профессор, кафедра «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика», ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», ул. Молодогвардейская, 244, г. Самара, 443100, Россия.
E-mail: kud-samgtu@yandex.ru

Курганова Ольга Юрьевна, аспирант, кафедра «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика», ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», ул. Молодогвардейская, 244, г. Самара, 443100, Россия.
E-mail: o.y.kurganova@gmail.com

Гаврилова Татьяна Евгеньевна, аспирант, кафедра «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика», ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», ул. Молодогвардейская, 244, г. Самара, 443100, Россия.
E-mail: totig@yandex.ru

Стефанюк Екатерина Васильевна, д.т.н., профессор, кафедра «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика», ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», ул. Молодогвардейская, 244, г. Самара, 443100, Россия.
E-mail: stef-kate@yandex.ru

Кудинов Игорь Васильевич, д.т.н., доцент, кафедра «Теоретические основы теплотехники и

гидромеханика», ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», ул. Молодогвардейская, 244, г. Самара, 443100, Россия.

E-mail: igor-kudinov@bk.ru

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Кудинов В. А., Курганова О. Ю., Гаврилова Т. Е., Стефанюк Е. В., Кудинов И. В. Исследование термонапряженного состояния цилиндра высокого давления паровой турбины Т – 100 – 130 // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2018. № 3. С. 78–91.

Authors

Kudinov Vasilij Aleksandrovich, doctor of physical and mathematical sciences, professor, head of department «Theoretical Basics of Heat Engineering and Hydromechanics», Federal state educational institution of higher professional education «Samara State Technical University», Molodogvardeyskaya str., 244, Samara, 443100, Russia.

E-mail: kud-samgtu@yandex.ru

Kurganova Olga Yuryevna, postgraduate, Department of «Theoretical Basics of Heat Engineering and Hydromechanics», Federal state educational institution of higher professional education «Samara State Technical University», Molodogvardeyskaya str., 244, Samara, 443100, Russia.

E-mail: o.y.kurganova@gmail.com

Gavrilova Tatiana Evgenievna, postgraduate, Department of «Theoretical Basics of Heat Engineering and Hydromechanics», Federal state educational institution of higher professional education «Samara State Technical University», Molodogvardeyskaya str., 244, Samara, 443100, Russia.

E-mail: totig@yandex.ru

Stefanyuk Ekaterina Vasilievna, doctor of technical sciences, professor, Department of «Theoretical Basics of Heat Engineering and Hydromechanics», Federal state educational institution of higher professional education «Samara State Technical University», Molodogvardeyskaya str., 244, Samara, 443100, Russia.

E-mail: stef-kate@yandex.ru

Kudinov Igor Vasilievich, doctor of technical sciences, associate professor, Department of «Theoretical Basics of Heat Engineering and Hydromechanics», Federal state educational institution of higher professional education «Samara State Technical University», Molodogvardeyskaya str., 244, Samara, 443100, Russia.

E-mail: igor-kudinov@bk.ru

Please cite this article in English as:

Kudinov V. A., Kurganova O. Yu., Gavrilova T. E., Stefanyuk E. V., Kudinov I. V. Study of thermostressed condition cylinder of high pressure of steam turbine T – 100 – 130. *Space, Time and Fundamental Interactions*, 2018, no. 3, pp. 78–91.