Общероссийский математический портал

В. А. Кудинов, А. Е. Исаев, С. А. Стефанюк, Р. Ж. Габдушев, В. А. Обухов, В. В. Некрылов, Расчет коэффициентов теплоотдачи и температуры на внутренней поверхности барабана после сброса давления в процессе аварийного останова котла БКЗ-420-140 НГМ, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2000, выпуск 9, 109–114

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu36>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 54.205.225.156

26 апреля 2023 г., 02:13:39

Теплофизика

УДК 536.2 (075)46

В.А. Кудинов, А.Е. Исаев, С.А. Стефанюк, Р.Ж. Габдушев, В.А. Обухов, В.В. Некрылов

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛООТДАЧИ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ БАРАБАНА ПОСЛЕ СБРОСА ДАВЛЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ АВАРИЙНОГО ОСТАНОВА КОТЛА БКЗ-420-140 НГМ

Получены приближенные аналитические решения двух задач теплопроводности (с переменными во времени температурами жидкости и стенки) для стенки барабана парового котла БКЗ-420-140 НГМ. На основе аналитических решений и по известной из эксперимента температуре наружной поверхности барабана путем решения обратной задачи теплопроводности найдена величина коэффициента теплоотдачи на границе жидкость-стенка при аварийном сбросе давления и последующем уменьшении температуры жидкости.

В процессе аварийного останова паровых котлов на тепловых электрических станциях необходимо производить сброс давления в барабанах. Частичный сброс давления происходит также и при любом останове котла действием одной из защит, в алгоритм которых входит открытие продувки пароперегревателя. В результате за достаточно короткий отрезок времени происходит значительное снижение температуры насыщения воды, находящейся в барабане. Циркуляром Ц-06-98(Т) «ЕС России» предписывается исключение открытия продувки из алгоритма защит котла из-за опасений превышенных скоростей охлаждения стенки барабана.

В связи с изложенным для обеспечения надежной работы барабана большой интерес представляет знание закона изменения температуры во времени на внутренней поверхности барабана в процессе сброса давления. Для определения этой температуры необходимо знать коэффициент теплоотдачи от жидкости к стенке барабана, который в данном случае является неизвестным. Его определение с помощью известных критериальных зависимостей является затруднительным ввиду отсутствия каких-либо данных об интенсивности кипения воды в процессе сброса давления.

В настоящей работе коэффициент теплоотдачи определяется путем решения обратной задачи теплопроводности. Для этого вначале находится приближенное аналитическое решение прямой задачи теплопроводности для стенки барабана. Подставляя в это решение экспериментальные значения температуры на внешней поверхности барабана, находят неизвестный коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности стенки. После определения коэффициента теплоотдачи, используя аналитическое решение прямой задачи теплопроводности, находят температуру внутренней поверхности стенки барабана.

Экспериментальные данные по изменению температуры насыщения в процессе сброса давления при аварийном останове котла БКЗ-420-140 НГМ, полученные на Самарской ТЭЦ, представлены на рисунке (кривая 3). Здесь же дана кривая изменения температуры наружной поверхности барабана (кривая 1), полученная также экспериментальным методом.

Полное решение задачи состоит из решения двух задач. Первая из них включает диапазон времени $0 \leq \tau \leq 420$ с (см. рисунок), а вторая - все оставшееся время ($420 \leq \tau \leq 1260$ с). Начальным условием для второй задачи является распределение температуры в стенке, полученное из решения первой задачи при $\tau = 420$ с.

При решении первой задачи принимаются следующие допущения:

- 1) коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности стенки не зависит от времени;
- 2) считаем, что на внешней поверхности барабана теплообмен отсутствует; последнее допущение не приведет к большим погрешностям при решении задачи, так как на внешней стенке находится слой тепловой изоляции.

Изменение температуры жидкости от времени в диапазоне $0 \leq \tau \leq 420$ с хорошо описывается следующей экспоненциальной функцией:

$$t_{ж}(Fo) = t_m - (t_m - t_0) \exp(-PdFo), \quad (1)$$

где t_m - минимальная температура в задаче (температура жидкости в барабане при $\tau \geq 420$ с); t_0 - температура жидкости в барабане в начальный момент времени ($\tau = 0$ с); $Pd = k\delta^2 / a$ - критерий Предводителя; k - коэффициент аппроксимации; δ - толщина стенки барабана; a - коэффициент температуропроводности материала барабана; $Fo = a\tau / \delta^2$ - число Фурье.

Математическая постановка задачи в данном случае имеет вид

$$\frac{\partial t(\eta, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(\eta, \tau)}{\partial \eta^2}, \quad (0 \leq \eta \leq \delta); \quad (2)$$

$$t(\eta, 0) = t_0; \quad (3)$$

$$\partial t(0, \tau) / \partial \eta = 0; \quad (4)$$

$$\lambda \frac{\partial t(\delta, \tau)}{\partial \eta} + \alpha [t(\delta, \tau) - t_{ж}(\tau)], \quad (5)$$

где t - температура; η - координата; τ - время; a - коэффициент температуропроводности; t_0 - начальная температура; λ - коэффициент теплопроводности материала барабана; α - коэффициент теплоотдачи от стенки барабана к жидкости; $t_{ж}(\tau)$ - температура жидкости; δ - толщина стенки барабана.

Введем следующие независимые переменные и параметры:

$$\theta = [t(\eta, \tau) - t_0] / (t_m - t_0), \quad Bi = \alpha \delta / \lambda; \quad x = \eta / \delta,$$

где θ - безразмерная температура; Bi - число Био; x - безразмерная координата.

С учетом принятых обозначений задача (2)-(5) примет вид

$$\frac{\partial \theta(x, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \theta(x, Fo)}{\partial x^2}; \quad (0 \leq x \leq 1) \quad (6)$$

$$\theta(x, 0) = 0; \quad (7)$$

$$\partial \theta(0, Fo) / \partial x = 0; \quad (8)$$

$$\partial \theta(1, Fo) / \partial x - Bi [1 - \exp(-PdFo) - \theta(1, Fo)] = 0. \quad (9)$$

Решение задачи (6)-(9), следуя [1,2], в первом приближении разыскивается в виде

$$\Theta(x, Fo) = 1 - \exp(-PdFo) - f_1(Fo) \varphi_1(x), \quad (10)$$

в котором $f_1(Fo)$ - неизвестная функция времени; $\varphi_1(x)$ - координатная функция.

Если в качестве координатной взять функцию

$$\varphi(x) = (Bi + 2) / Bi - x^2, \quad (11)$$

то соотношение (10) будет точно удовлетворять граничным условиям (8), (9). Кроме того, при $Bi \rightarrow \infty$ и при $x=1$ соотношение (10) приводится к формуле (1), т.е. температура стенки со стороны жидкости в любой момент времени будет равна температуре жидкости.

Для нахождения неизвестной функции времени составим невязку дифференциального уравнения (6) и потребуем ортогональности невязки к координатной функции (11), т.е.

$$\int_0^1 [Pd \exp(-PdFo) - f_1'(Fo) \varphi_1(x) - 2f_1(Fo)] (N - x^2) dx = 0,$$

где $N = (Bi + 2) / Bi$.

После определения интегралов приходим к обыкновенному дифференциальному уравнению первого порядка

$$f_1'(Fo) + f_1(Fo) \nu_1 - \nu_2 Pd \exp(-PdFo) = 0, \quad (12)$$

в котором введены обозначения $\nu_1 = M_1 / N_1$; $\nu_2 = M_2 / N_1$; $N_1 = N^2 - \frac{2}{3}N + \frac{1}{5}$; $M_1 = 2\left(N - \frac{1}{3}\right)$;

$$M_2 = N - \frac{1}{3}.$$

Для нахождения решения уравнения (12) будем использовать метод варьирования произвольной постоянной (метод Лагранжа). Для этого найдем сначала решение соответствующего однородного уравнения

$$f'(Fo) + f'(Fo)v_1 = 0. \quad (13)$$

Интегрируя (13), получим

$$f'(Fo) = C \exp(-v_1 Fo), \quad (14)$$

где C - постоянная интегрирования.

Решение для уравнения (12) будем разыскивать в виде (14), считая C не постоянной, а функцией времени, т.е.

$$f_1(Fo) = C(Fo) \exp(-v_1 Fo). \quad (15)$$

Дифференцируя (15), будем иметь

$$f_1'(Fo) = C'(Fo) \exp(-v_1 Fo) - C(Fo)v_1 \exp(-v_1 Fo). \quad (16)$$

Подставляя (15), (16) в (12), получим

$$C'(Fo) \exp(-v_1 Fo) - v_2 Pd \exp(-Pd Fo) = 0. \quad (17)$$

Решение уравнения (17) имеет вид

$$C(Fo) = \frac{v_2 Pd}{v_1 - Pd} \exp(v_1 - Pd) Fo - C_1, \quad (18)$$

где C_1 - постоянная интегрирования.

Подставляя (18) в (15), находим

$$f_1(Fo) = \left[\frac{v_2 Pd}{v_1 - Pd} \exp(v_1 - Pd) Fo - C_1 \right] \exp(-v_1 Fo). \quad (19)$$

Соотношение (10) с учетом (19) примет вид

$$\Theta(x, Fo) = 1 - \exp(-Pd Fo) - \left[\frac{v_2 Pd}{v_1 - Pd} \exp(v_1 - Pd) Fo - C_1 \right] \exp(-v_1 Pd) \phi_1(x). \quad (20)$$

Постоянная интегрирования C_1 находится из начального условия (7). Для этого составляется его невязка и требуется ортогональность невязки к координатной функции (11), т.е.

$$\int_0^1 \left(\frac{v_2 Pd}{v_1 - Pd} - C_1 \right) \phi_1(x) \phi_1(x) dx = 0. \quad (21)$$

После определения интегралов и последующего решения алгебраического линейного уравнения получим

$$C_1 = v_2 Pd / (v_1 - Pd). \quad (22)$$

Подставляя (22) в (20), в замкнутом виде находим решение задачи (6)-(9) в первом приближении

$$\Theta(x, Fo) = 1 - \exp(-Pd Fo) + \frac{v_2 Pd}{v_1 - Pd} [\exp(-v_1 Fo) - \exp(-Pd Fo)] \left(\frac{Bi + 2}{Bi} - x^2 \right). \quad (23)$$

Соотношение (23) в явном виде содержит неизвестный коэффициент теплоотдачи α на внутренней поверхности стенки. Подставляя экспериментальные значения температуры в левую часть соотношения (23), относительно α получим трансцендентное уравнение.

Найдем величину коэффициента теплоотдачи при следующих исходных данных:

$$\delta = 0,112 \text{ м}; \quad \lambda = 48 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}; \quad k = 0,0117 \text{ 1/с}; \quad Pd = 13,104 \text{ 1/с}; \quad a = 11,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$t_0 = 339^\circ \text{C}; \quad t_m = 316^\circ \text{C}.$$

Экспериментальные значения температур на внешней поверхности барабана ($x=0$), описываемые кривой 1 (см. рисунок), на отрезке времени $300 \leq t \leq 420$ с аппроксимируем следующей линейной функцией:

$$t_{cm} = A_1 + A_2 Fo, \quad (24)$$

где $A_1 = 342,2523$; $A_2 = -15,873$ - коэффициенты аппроксимации.

Соотношение (24) приведем к безразмерному виду

$$\Theta_{cm}(t_m - t_0) + t_0 = A_1 + A_2 Fo.$$

Отсюда

$$\Theta_{cm} = \frac{A_1 - t_0}{t_m - t_0} + \frac{A_2}{t_m - t_0} Fo = -0,1414 + 0,6901 Fo. \quad (25)$$

Подставляя (25) в левую часть соотношения (23) и интегрируя полученное выражение в пределах от $\tau = 300 \text{ с}$ ($Fo = 0,2679$) до $\tau = 420 \text{ с}$ ($Fo = 0,375$), получим

$$\begin{aligned} -0,1414(Fo_2 - Fo_1) + 0,34505(Fo_2^2 - Fo_1^2) = Fo_2 - Fo_1 + \frac{1}{Pd}(1 + DN) \times \\ \times [\exp(-PdFo_2) - \exp(-PdFo_1)] - \frac{DN}{v_1} [\exp(-v_1Fo_2) - \exp(-v_1Fo_1)], \end{aligned} \quad (26)$$

где $D = v_2 Pd / (v_1 - Pd)$.

Соотношение (26) относительно неизвестного коэффициента теплоотдачи α является трансцендентным уравнением. Этому уравнению удовлетворяет величина $\alpha = 470 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$. Используя найденное значение α , по формуле (23) получим распределение температуры на внутренней поверхности стенки барабана на отрезке времени от $\tau = 0 \text{ с}$ до $\tau = 420 \text{ с}$. Анализ полученных результатов позволяет заключить, что в первую минуту от момента начала падения температуры жидкости температура внутренней поверхности стенки уменьшается на $3,6^\circ \text{С}$. Отметим, что инструкцией по эксплуатации барабана эта величина лимитируется значением 6°С в минуту.

Для получения значений температур внутренней поверхности стенки барабана при $\tau > 420 \text{ с}$ решение (23) непригодно ввиду того, что температура жидкости для этого времени становится постоянной. Для получения решения на этом отрезке времени будем решать задачу теплопроводности для стенки барабана при известных из эксперимента граничных условиях 1-го рода на его внешней поверхности и при граничных условиях 3-го рода на внутренней, считая, что коэффициент теплоотдачи $\alpha = 470 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ останется неизменным. Математическая постановка задачи в данном случае имеет вид

$$\frac{\partial t(x, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 t(x, Fo)}{\partial x^2} \quad (0 \leq x \leq 1); \quad (27)$$

$$t(x, 0) = t_0(x); \quad (28)$$

$$\partial t(0, Fo) / \partial x - Bi[t(0, Fo) - t_{жс}] = 0; \quad (29)$$

$$t(1, Fo) = A'_1 + A'_2 Fo, \quad (30)$$

где A'_1 , A'_2 - коэффициенты аппроксимации граничного условия 1-го рода на внешней поверхности стенки барабана в диапазоне времени от $\tau_1 = 0 \text{ с}$ ($Fo_1 = 0$) до $\tau_2 = 840 \text{ с}$ ($Fo_2 = 0,75$). Для коэффициентов A'_1 и A'_2 были получены следующие значения: $A'_1 = 336,3$; $A'_2 = -12,9333$. В задаче (27)-(30) началом отсчета времени ($\tau=0$) будет время, равное 420 с времени общей задачи.

Для приведения граничных условий (29), (30) к однородным введем новую функцию [1]

$$T(x, Fo) = t(x, Fo) + b_1 + b_2 x, \quad (31)$$

где b_1 и b_2 найдем так, чтобы граничные условия (29), (30) были однородными. Подставляя (31) в (29), (30), получим

$$\frac{\partial T(0, Fo)}{\partial x} - BiT(0, Fo) = b_2 - Bib_1 - Bit_{жс}; \quad (32)$$

$$T(1, Fo) = A'_1 + A'_2 Fo + b_1 + b_2. \quad (33)$$

Граничные условия для функции $T(x, Fo)$ будут однородными, если потребовать равенства нулю правых частей соотношений (32), (33). Отсюда для определения коэффициентов b_1 , b_2 будем иметь следующую систему двух алгебраических линейных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} b_2 - Bib_1 - Bit_{жс} &= 0; \\ A'_1 + A'_2 Fo + b_1 + b_2 &= 0. \end{aligned} \right\}$$

Ее решение имеет вид

$$b_1 = -K(A'_1 + A'_2 Fo + Bit_{жс}); \quad b_2 = Bi(b_1 + t_{жс}); \quad k = 1/(1 + Bi).$$

Математическая постановка задачи для функции $T(x, Fo)$ будет следующей:

$$\frac{\partial T(x, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T(x, Fo)}{\partial x^2} - A_2' K(1 + Bix); \quad (34)$$

$$T(x, 0) = t_0 + b_1 + b_2 x; \quad (35)$$

$$\partial T(0, Fo) / \partial x - BiT(0, Fo) = 0; \quad (36)$$

$$T(1, Fo) = 0. \quad (37)$$

Приближенное решение задачи (34)-(37) разыскивается в виде

$$T(x, Fo) = f(Fo)\varphi(x), \quad (38)$$

где $\varphi(x)$ - координатная функция, принимаемая в виде полинома

$$\varphi(x) = D_1 + D_2 x + x^2. \quad (39)$$

Коэффициенты D_1 и D_2 определяются так, чтобы точно выполнялись граничные условия (36), (37). Формулы для них будут следующими:

$$D_1 = -1/(1 + Bi); \quad D_2 = -Bi/(1 + Bi).$$

Таким образом, соотношение (38) с учетом (39) точно удовлетворяет граничным условиям (36), (37). Неизвестную функцию времени $f(Fo)$ найдем из условия ортогональности невязки уравнения (34) к координатной функции, равной единице (нулевое приближение) [2]. Отсюда для $f(Fo)$ получим следующее обыкновенное дифференциальное уравнение

$$f'(Fo) = H_2 f + H_3, \quad (40)$$

где $H_2 = 2/H$; $H_3 = H_1/H$; $H = D_1 + \frac{1}{2}D_2 + \frac{1}{3}$; $H_1 = A_2'K - \frac{1}{2}A_2'BiK$.

Интегрируя уравнение (40), получим

$$f(Fo) = C \exp(H_2 Fo) - H_4, \quad (41)$$

где $H_4 = H_3/H_2$, C - постоянная интегрирования.

Соотношение (38) с учетом (41) будет иметь вид

$$T(x, Fo) = [C_1 \exp(H_2 Fo) - H_4](D_1 + D_2 x + x^2). \quad (42)$$

Ввиду того, что при $Fo = 0$ в точке $x = 1$ точно выполняется граничное условие 1-го рода (20), постоянную интегрирования C_1 будем находить из выполнения начального условия в точке $x = 0$, известного из решения задачи (2)-(5) при $\tau = 420$ с. Температура в этой точке равна $328,5^\circ\text{C}$ (см. рисунок). Эта температура и будет начальной температурой в точке $x = 0$ при $Fo = 0$ для задачи (34)-(37). Таким образом, начальное условие (35) примет вид

$$T(0; 0) = t_0 + b_1, \quad (43)$$

где $t_0 = 328,5^\circ\text{C}$.

Графики изменения температуры стенки барабана и жидкости во времени:

1 - температура наружной поверхности стенки барабана; 2 - температура внутренней поверхности стенки барабана; 3 - температура жидкости в барабане

Подставляя (42) в (43), получим

$$C_1 = [t_0 - K(A'_1 + Bi t_{жс}) + D_1 H_4] / D_1. \quad (44)$$

С учетом (44) решение задачи (34) - (37) приводится к виду

$$T(x, Fo) = \left[\frac{t_0 - K(A'_1 + Bi t_{жс}) + D_1 H_4}{D_1} \exp(H_2 Fo) - H_4 \right] (D_1 + D_2 x + x^2). \quad (45)$$

Таким образом, полученное решение точно удовлетворяет граничным условиям (36), (37), начальному условию (35) в точках $x = 0$ и $x = 1$ и приближенно удовлетворяет дифференциальному уравнению (34).

По известному значению $T(x, Fo)$ величина искомой функции $t(x, Fo)$ находится из (31).

Результаты расчетов температуры внутренней поверхности стенки барабана по формуле (45) для времени $0 \leq \tau \leq 840$ с задачи (27)-(30) приведены на рисунке. Можно отметить, что перепад температуры по толщине стенки барабана при $\tau = 840$ с ($\tau = 1260$ с для общей задачи) составляет $3,6^\circ\text{C}$, причем ее охлаждение к этому моменту времени еще не заканчивается.

Все вышеизложенное позволяет сделать следующие выводы.

1. На основе полученного в работе аналитического решения задачи теплопроводности для стенки барабана парового котла БКЗ-420-140 НГМ при экспоненциальном законе изменения температуры жидкости внутри барабана при аварийном сбросе давления, а также при известных из эксперимента значениях температуры на внешней поверхности барабана путем решения обратной задачи теплопроводности найдена величина коэффициента теплоотдачи на границе жидкость-стенка. Его величина $\alpha = 470 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ позволяет заключить о наличии процесса кипения жидкости в результате уменьшения ее температуры насыщения.

2. Используя найденное значение α , а также полученные в работе аналитические решения, нашли зависимость температуры внутренней поверхности стенки барабана от времени. Полученные результаты позволяют оценить скорость падения температуры внутренней поверхности стенки во времени, максимум которой составляет $3,6^\circ$ в минуту, что не превышает величин, допускаемых инструкциями по эксплуатации барабана. Максимальный перепад температуры по толщине стенки наблюдается на 330 секунде процесса охлаждения и составляет $8,1^\circ\text{C}$.

3. Процессы уменьшения температуры жидкости и ее кипения в результате сброса давления будут наблюдаться и в отверстиях барабанов (в зонах присоединения экранных труб), с той лишь разницей, что жидкость в отверстиях движется с некоторой скоростью. В связи с этим коэффициенты теплоотдачи здесь будут превышать значения, найденные в настоящей работе. Все это позволяет сделать заключение о наличии больших температурных градиентов в зоне отверстий, где довольно часто обнаруживаются дефекты в виде трещин. Исследование температурного и термонапряженного состояний стенки барабана в зоне отверстий является темой следующей работы авторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кудинов В.А., Калашиников В.В., Лаптев Н.И., Гнеденко В.В. Теплообмен и тепловое воспламенение в многослойных конструкциях. Самара: СамГТУ, 1996. 280 с.
2. Кудинов В.А., Калашиников В.В., Карташов Э.М., Лаптев Н.И., Сергеев С.К. Тепломассоперенос и термоупругость в многослойных конструкциях. М.: Энергоатомиздат, 1997. 426 с.
3. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М.: Высш. школа, 1985. 480 с.