

УДК 681.518.52

Зотов Е.Н.,¹ Добривечер В.В.,²
Москаленко А.А.,¹ Проценко Л.Н.¹¹Институт технической теплофизики НАН Украины²ООО “Интенсивные технологии ЛТД”

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ТРУБЕ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ НА ЕЁ ВНУТРЕННЮЮ ПОВЕРХНОСТЬ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ

Роботу присвячено вирішенню актуальної для практики проблеми – контролю температур внутрішньої поверхні труби при нанесенні захисної плівки з'єднань хрому в умовах вакууму. Розроблено програму розрахунку температур у стінці труби, призначену для інженерних розрахунків з метою оптимізації технологічних режимів і отримання високоякісного захисного покриття.

Работа посвящена решению актуальной для практики проблемы – контроля температур внутренней поверхности трубы при нанесении защитной пленки соединений хрома в условиях вакуума. Разработана программа расчета температур в стенке трубы, предназначенная для инженерных расчетов с целью оптимизации технологических режимов и получения высококачественного защитного покрытия.

The paper is devoted to solving the problem of high urgency for practice: the control of temperatures at the inner surface of a pipe during applying a protective coating of chrome compounds in conditions of vacuum. A specialized program have been developed for simulation of temperatures at the pipe wall, which is intended for engineering calculations with the purpose of optimizing the industrial conditions and obtaining high-quality protective coating.

C – удельная теплоемкость;
 D – диаметр наружный;
 d – диаметр внутренний;
 L – высота;
 q – плотность теплового потока;
 R – радиус;
 r, z, φ, τ – радиальная, продольная, трансверсальная
и временная координаты;
 T – температура;

λ – коэффициент теплопроводности;
 ρ – удельная плотность;
 τ – время.

Индексы нижние:

0 – начальный
 $вн$ – внутренний;
 $н$ – наружный;
 i, j, k – координатный;
 V – объемный.

Введение

Решением актуальной проблемы повышения износостойкости внутренней поверхности труб различного назначения, которые подвергаются воздействию высоких температур, давлений и абразивному износу движущейся средой, усугубленному резкими колебаниями этих и других параметров потока, активно занимаются специалисты в областях материаловедения, металлургии, термообработки металлов. Значительные успехи в этих поисках были достигнуты путем внедрения технологии нанесения защитных пленок тугоплавких металлов на внутреннюю поверхность труб.

В частности, значительные надежды возлагаются на подобные разработки в области изготовления труб специального назначения для артиллерийских систем бронетехники, для которых срок эксплуатации после нанесения защитной пленки в ряде случаев удавалось увеличить в два и более раз [1].

В последние годы интенсивно проводятся работы по созданию надёжных защитных покрытий для внутренней поверхности каналов таких труб. В ходе этих разработок определяющее место занимает поиск технологий, обеспечивающих оптимальные температурные режимы внутренней поверхности трубы во время нанесения защитного покрытия. В частности, для получения

качественного соединения защитного слоя и металла внутренней поверхности трубы требуется строгое соблюдение условия нахождения температуры этой поверхности на уровне не ниже 350 °С [1]. Эта температура создаётся предварительным объёмным нагревом заготовки в печи. В процессе последующих очистки поверхности и нанесения слоя покрытия возникает значительный местный перегрев приповерхностного слоя металла, и этот перегрев ощущается даже на внешней поверхности трубы. В то же время температура металла не должна превышать пороговые значения температур, при которых проведена предшествующая операция упрочняющей термообработки заготовки. В противном случае, произойдёт потеря механических свойств и, соответственно, ресурсных характеристик трубы.

Так как технология нанесения покрытия в вакууме практически исключает возможность измерений температур внутренней поверхности трубы с помощью температурных датчиков, решение задачи контроля температур становится невозможным без расчетов поля температур трубы в процессе нанесения покрытия. Поэтому создание программы инженерного расчета как инструмента определения температур во время опыта является актуальным.

Математическая модель и метод расчета температурного поля

Температурное поле в теле трубы создается предварительным нагревом ее в печи, а затем локальным нагревом через участки внутренней поверхности трубы при работе системы газовой очистки и испарителя металлов. При этом источники теплоты включаются тогда, когда температура трубы достигнет заданного значения во всех точках трубы (одинакового – в пределах нескольких градусов). Таким образом, необходимо рассчитать температуру трубы с момента включения системы газовой очистки и испарителя металлов до момента их выключения при постоянной начальной температуре T_0 трубы.

При моделировании температурного поля будем использовать цилиндрическую систему координат (r, z, φ) , в которой ось трубы совпадает с

осью z , а начало координат находится в плоскости основания (начала) трубы. Так как процесс нагрева всеми источниками теплоты является симметричным относительно оси трубы, то и температурное поле будет симметричным относительно оси z , т.е. температура будет являться функцией только координат r и z и времени τ , т.е. $T = T(r, z, \tau)$.

Также предполагается, что материал трубы является однородным и изотропным [2], а теплофизические свойства: коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность являются функциями только температуры. Тогда температурное поле можно описать двумерным уравнением теплопроводности в цилиндрической системе координат [3]:

$$C_V(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right),$$

$$\tau \geq 0, R_{\text{вн}} \leq r \leq R_{\text{нар}}, 0 \leq z \leq L; \quad (1)$$

при начальных условиях

$$T(r, z, \tau) \Big|_{\tau=0} = T_0 \quad (2)$$

и граничных условиях на поверхности трубы (конечного полого цилиндра) на внутренней и внешней цилиндрических поверхностях, на нижнем и верхнем основаниях цилиндра:

$$\lambda \frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=R_{\text{вн}}} = -q_0(z),$$

$$\lambda \frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=R_{\text{нар}}} = q_L(z), \quad (3)$$

$$\lambda \frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial z} \Big|_{z=0} = -q_{\text{вн}}(r),$$

$$\lambda \frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial z} \Big|_{z=L} = -q_{\text{нар}}(r), \quad (4)$$

где $R_{\text{вн}} \leq r \leq R_{\text{нар}}, 0 \leq z \leq L$.

Плотность теплового потока на внутренней цилиндрической поверхности в области воздействия системы ионной очистки и электродугового испарителя металлов предполагается постоян-

ной, а вне зоны их влияния – равной нулю, т.е. $q_{\text{вн}}(z)$ – кусочно-постоянная функция координаты z . Плотность теплового потока на торцах трубы и на наружной цилиндрической поверхности – также кусочно-постоянная функция от координат.

Согласно [2, 3], задача теплопроводности (1) – (4) с нелинейными граничными условиями (3), (4) явного аналитического решения не имеет. Поэтому такую задачу решают численными методами [4].

Если рассматривать температуру трубы в точках равномерной (с одинаковым шагом вдоль каждой координаты) разностной сетки (r_i, z_j, τ_k) , где $i = 0 \dots n; j = 0 \dots m; k = 0 \dots p; r_0 = R_{\text{вн}}; r_n = R_{\text{нар}}; z_0 = 0; z_m = L; \tau_0 = 0$, то, согласно [4], разностная схема запишется в виде:

$$C_{Vij}^k \frac{T_{ij}^{k+1} - T_{ij}^k}{\delta\tau} = \frac{1}{r_i (h_i + h_{i+1})} \times$$

$$\times \left[\frac{\lambda_{i+1,j}^k + \lambda_{ij}^k}{2} \left(r_i + \frac{h_{i+1}}{2} \right) \frac{T_{i+1,j}^{k+1} - T_{i,j}^{k+1}}{h_{i+1}} - \right.$$

$$\left. - \frac{1}{r_i (h_i + h_{i-1})} \left[\frac{\lambda_{i-1,j}^k + \lambda_{ij}^k}{2} \left(r_i - \frac{h_i}{2} \right) \frac{T_{ij}^{k+1} - T_{i-1,j}^{k+1}}{h_i} \right] + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{r_i (h_i + h_{i+1})} \left[\frac{\lambda_{i+1,j}^k + \lambda_{ij}^k}{2} \left(r_i + \frac{h_{i+1}}{2} \right) \frac{T_{i+1,j}^k - T_{ij}^k}{h_{i+1}} \right] - \right.$$

$$\left. - \frac{1}{r_i (h_i + h_{i-1})} \left[\frac{\lambda_{i-1,j}^k + \lambda_{ij}^k}{2} \left(r_i - \frac{h_i}{2} \right) \frac{T_{ij}^k - T_{i-1,j}^k}{h_i} \right] + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{(g_j + g_{j+1})} \left[\frac{\lambda_{i,j+1}^k + \lambda_{ij}^k}{2} \frac{T_{i,j+1}^{k+1} - T_{i,j}^{k+1}}{g_{j+1}} \right] - \right.$$

$$\left. - \frac{1}{(g_j + g_{j-1})} \left[\frac{\lambda_{i,j-1}^k + \lambda_{ij}^k}{2} \frac{T_{ij}^{k+1} - T_{i,j-1}^{k+1}}{g_j} \right] + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{(g_j + g_{j+1})} \left[\frac{\lambda_{i,j+1}^k + \lambda_{ij}^k}{2} \frac{T_{i,j+1}^k - T_{ij}^k}{g_{j+1}} \right] - \right.$$

$$\left. - \frac{1}{(g_j + g_{j-1})} \left[\frac{\lambda_{i,j-1}^k + \lambda_{ij}^k}{2} \frac{T_{ij}^k - T_{i,j-1}^k}{g_j} \right]. \quad (5)$$

Для $i = 1 \dots (n - 1); j = 1 \dots (m - 1)$, где $h_i = r_i - r_{i-1}$ – шаг по оси r , $g_j = z_j - z_{j-1}$ – шаг по оси z , $\delta\tau$ – шаг по времени; $\lambda_{ij}^k = \lambda(T_{ij}^k)$; $C_{Vij}^k = C_V(T_{ij}^k)$; $T_{ij}^k = T(r_i, z_j, t_k)$.

В случае, когда $R_{\text{вн}} = 0$, в точке $r = 0$ имеется особенность, при этом разностная схема для $r = 0$ ($i = 0$) запишется в виде:

$$C_{V0j}^k \frac{T_{0j}^{k+1} - T_{0j}^k}{\delta\tau} = \frac{2}{h_1^2} \frac{3\lambda_{0j}^k + \lambda_{1j}^k}{4} \left[(T_{1j}^{k+1} - T_{0j}^{k+1}) + (T_{1j}^k - T_{0j}^k) \right]. \quad (6)$$

Выражения для плотности теплового потока q , которые задаются на поверхности трубы, имеют нижеприведенный вид [4]:

на поверхности $z = 0$ и $z = L$:

$$q_i^k = \frac{\lambda_{ij}^k + \lambda_{ij+p}^k}{2} \frac{T_{ij}^k - T_{ij+p}^k}{g_j} + \frac{C_{Vij}^k + C_{Vij}^{k-1}}{2} \frac{T_{ij}^k - T_{ij}^{k-1}}{\delta\tau} \frac{g_j}{2}, \quad (7)$$

где при $z = 0: j = 0, p = 1$; при $z = L: j = m, p = -1$; и на поверхности $r = R_{\text{вн}}$ и $r = R_{\text{нар}}$:

$$q_j^k = \frac{\lambda_{ij}^k + \lambda_{i-p,j}^k}{2} \frac{T_{nj}^k - T_{i+p,j}^k}{R \ln \left(\frac{R}{R + ph_i} \right)} + \frac{C_{Vij}^k + C_{Vij}^{k-1}}{2} \frac{T_{ij}^k - T_{ij}^{k-1}}{\delta\tau} \frac{h_i}{2} \left(1 - \frac{h_i}{4R} \right); \quad (8)$$

где при $r = R_{\text{вн}}: i = 0, p = 1, R = R_{\text{вн}}$; при $r = R_{\text{нар}}: i = n, p = -1, R = R_{\text{нар}}$.

Разностная схема (5) при граничных условиях (6, 7, 8) реализована в виде программы расчета (далее программа Vilab), предназначенной для определения осесимметричного температурного поля полого (или сплошного) конечного цилиндра заданной геометрии при известной начальной температуре цилиндра T_0 , известных значениях коэффициента теплопроводности λ , удельной теплоемкости C , удельной плотности ρ , а также граничных условиях теплообмена на поверхности в виде температуры T или плотности теплового потока q , как кусочно-постоянных функций от координаты r или z .

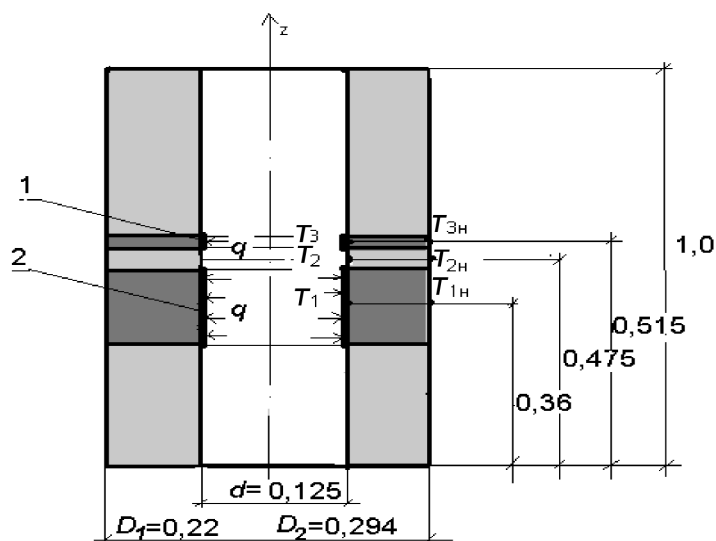


Рис. 1. Схема расположения характерных точек для расчета температурного поля на двух фрагментах спецтрубы (с толщиной стенки 47,5 мм и толщиной стенки 84,5 мм): 1 – зона, обогреваемая электродуговым испарителем; 2 – зона, обогреваемая системой ионной очистки.

Описание программы расчета

При вызове программы в первом окне выбирается форма образца и задаются его размеры, параметры сетки и теплофизические свойства материала в единицах измерений системы СИ.

На следующем этапе, в окне “Начальные условия”, задается начальная температура тела в градусах Цельсия, а затем в окне “Граничные условия” вводятся границы разбиения поверхности трубы, тип граничных условий и значения плотности теплового потока или температуры, или коэффициента теплоотдачи на соответствующих участках границы с заданной длиной в метрах. Плотность теплового потока задается в единицах ($\text{МВт}/\text{м}^2$).

В окне “Расчеты” задаются временные параметры расчета, шаг по времени Δt , длительность нагрева, затем выполняется расчет. По окончании расчетов можно просмотреть их результаты, перейдя в окно “График от времени”. Здесь можно вывести на экран графики зависимости температуры от времени в интересующих точках образца, а также результаты расчетов в табличном виде.

Разработанная программа Vilab на начальном этапе использовалась для расчета температурно-

го поля экспериментального образца стального полого цилиндра ($\lambda = 19,5 \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$, $C = 481 \text{ Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$, $\rho = 7850 \text{ кг}/\text{м}^3$) высотой $L = 0,245 \text{ м}$, внутренним диаметром $d = 0,125 \text{ м}$, наружным диаметром $D = 0,22 \text{ м}$. Нагрев его внутренней поверхности производился через кольцевой участок высотой 30 мм, отстоящий от основания цилиндра на расстоянии 20 мм. Плотность теплового потока на этом участке составляла: $q = 0,178 \text{ МВт}/\text{м}^2$, начальная температура $T_0 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$. Программа тестировалась путем сравнения результатов расчета с расчетами, выполненными для тех же условий другими методами – аналитическими и по уже существующим программам. В частности, сравнение результатов расчета температуры стенки трубы, выполненных с помощью программы Vilab, и результатов расчета, выполненных по известной программе Comsol Multiphysics, показало, что для этих задач несовпадение полученных значений температурного поля находится в пределах (1...5) $^\circ\text{C}$.

Для максимального приближения к реальной технологии нанесения защитного покрытия расчет также был выполнен для условий работы двух внутренних источников локального нагрева трубы, расположенных на расстоянии 30 мм друг от друга (рис. 1): электродугового испарителя металлов, который выделяет на кольцевом участке высотой 50 мм внутренней поверхности трубы мощность 3 кВт; системы ионной газовой очистки, которая выделяет 5 кВт на кольцевом участке высотой 200 мм. Длительность работы испарителя и системы очистки – 15 мин.

Усложняющим фактором для отработки технологических режимов работы оборудования является особенность геометрии трубы: при постоянном внутреннем диаметре, её внешняя поверхность представляет собой конус, а толщина стенки трубы изменяется примерно вдвое. Поэтому в данной работе с помощью программы Vilab расчеты температурного поля выполнены для двух фрагментов стальной трубы ($L = 1,0 \text{ м}$, $d = 0,125 \text{ м}$, $D_1 = 0,22 \text{ м}$; $D_2 = 0,294 \text{ м}$) с различной толщиной стенки, соответственно 47,5 мм и 84,5 мм.

Результаты расчетов представлены на рис. 2 и рис. 3 в виде зависимостей температуры от вре-

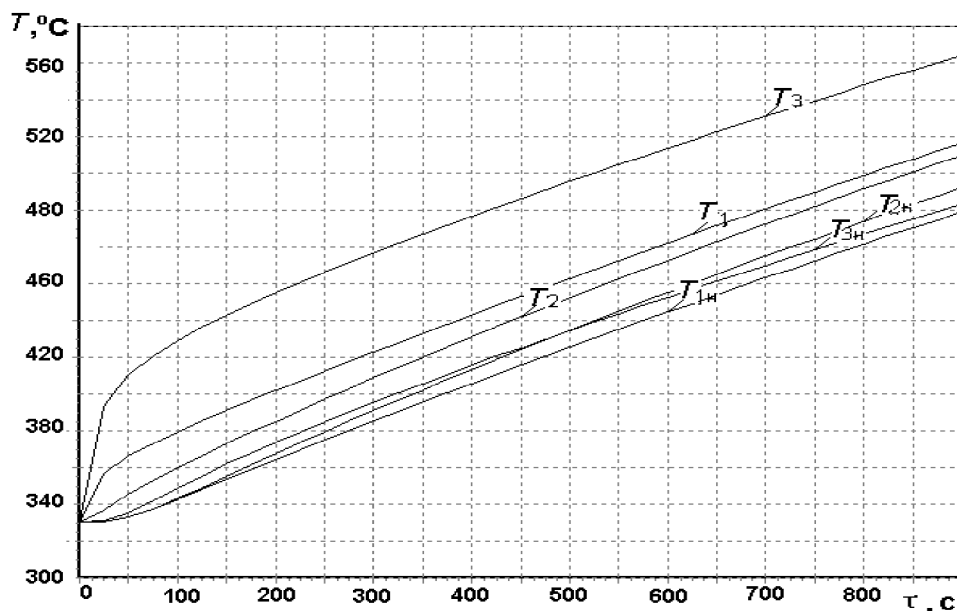


Рис. 2. Температурные кривые в характерных точках трубы при нагреве ее фрагмента (с толщиной стенки 47,5 мм) локальными источниками подвода теплоты.

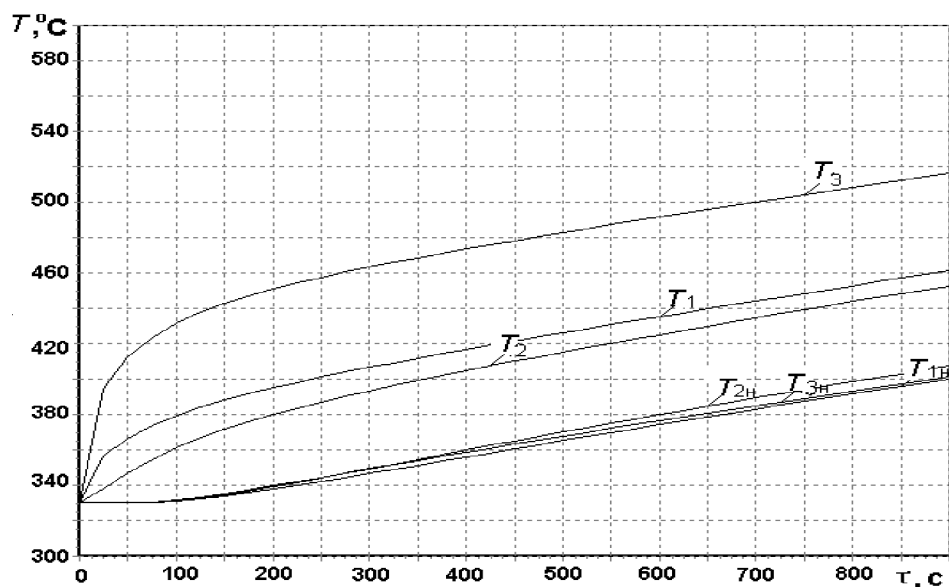


Рис. 3. Температурные кривые в характерных точках трубы при нагреве ее фрагмента (с толщиной стенки 84,5 мм) локальными источниками подвода теплоты.

мени в характерных точках внутренней и внешней поверхности трубы с различной толщиной стенки, при прочих равных условиях, в процессе нанесения защитного покрытия (см. рис. 1).

Из результатов расчета температурного поля трубы следует, что чем больше толщина стенки трубы, тем меньше рост температуры трубы и тем больше перепад температуры трубы по толщине

стенки в зоне нагрева. При этом значения температуры на наружной поверхности трубы в зоне нагрева во время работы источников нагрева практически одинаковы, а температура трубы по мере удаления от зоны нагрева быстро выравнивается и уже на расстоянии 10 мм и более от зоны нагрева практически одинакова по толщине стенки.

Выводы

1. Разработанная программа по точности расчета температурного поля трубы отвечает технологическим требованиям, предъявляемым к процессу нанесения защитных покрытий в трубах. Ее преимуществом является наличие простого интерфейса, удобного для использования инженерами и технологами непосредственно в производственных процессах.

2. Отсутствие перепада температуры вне зоны нагрева позволяет вести контроль состояния наружной поверхности трубы, а по данным измерений термодатчиками температуры наружной стенки расчетом легко восстановить максимальные значения температуры на внутренней поверхности, что необходимо при выборе режима работы системы нанесения защитного покрытия.

3. Для толщины стенки трубы 84,5 мм и более, температурный режим металла при нанесении покрытия можно считать удовлетворительным, а с уменьшением толщины стенки до 47,5 мм в зоне нагрева температура становится существенно выше, что может вызвать снижение достигнутой после термообработки прочности металла трубы. Избежать этого можно, снижая

мощность излучателей пропорционально утоньшению стенки трубы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Василина В.Г., Надтока В.Н., Зайцев В.И.* Экспериментальная установка для нанесения ионно-плазменных покрытий на внутреннюю поверхность труб // *Вакуумная техника и технология.* – 2006. – Т. 16, № 1. – С. 83 – 85.
2. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
3. *Карслоу Г., Егер Д.,* Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 487 с.
4. *Круковский П.Г.* Обратные задачи тепломассообмена (Общий инженерный подход). – К.: Институт технической теплофизики, 1998. – 224 с.
5. *Москаленко А.А., Зотов Е.Н., Добривечер В.В., Надтока В.Н., Хямялайнен Л.Т.* Экспериментально-расчетное определение поля температур полового цилиндра при локальном внутреннем обогреве / Сборник докладов “Результаты исследований в области энергетики и их практическое значение”. – М.: ИВТ РАН, 2008. – С. 180 – 181.

Получено 26.03.2009 г.