

**Savochka Petr Anatolievich**

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: Savochka07@mail.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634371603.

Assistant.

УДК 53.004

**А.И. Жорник, Ю.А. Прокопенко, А.Е. Чистяков**

### **ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ПОЛОГО ЦИЛИНДРА**

*Рассматривается численное решение задачи теплопроводности, описывающее процесс нанесения порошковых покрытий на внутренние поверхности стальных труб методом центробежного индукционного припекания. Граничное условие на внутренней поверхности полого цилиндра (трубы) учитывает поглощение тепла порошковым слоем. На внешней - (помимо поверхностных источников, связанных с индукционным нагревом) конвекцию и излучение, то есть является нелинейным. Проводится сравнение рассчитанного распределения температуры по толщине цилиндра с аналогичным кусочно-линеаризованным решением.*

*Покрывание; температурное поле; коэффициент теплопроводности.*

**A.I. Zhornik, Yu.A. Prokopenko, A.E. Chistyakov**

### **NUMERICAL SOLUTION OF THE INDUCTION HEATING PROBLEM FOR THE HOLLOW CYLINDER**

*Numerical solution of the thermal conductivity problem for the steel tubes' internal surfaces powder covering process by the method of centrifugal sticking is considered in the work. Boundary condition on the inner surface of the hollow cylinder (tube) implies heat absorption by the powder layer. On the external one (besides surface sources connected with induction heating) convection and radiation are included, that is we have nonlinear boundary condition. Comparison of the computed temperature radius distribution with an analogous sectionally linearized solution is fulfilled.*

*Covering; temperature field; heat conductivity factor.*

**Введение.** Металлические трубы со внутренним порошковым покрытием находят широкое применение в различных отраслях промышленности. Одним из методов нанесения покрытий является метод центробежного индукционного припекания, который заключается в засыпании порошковой шихты во вращающийся цилиндр, которая под действием центробежной силы равномерно распределяется по внутренней поверхности полого металлического цилиндра[5,6]. Металл нагревается индуктором, расположенным вблизи внешней поверхности цилиндра. Мощность объёмных источников распределяется равномерно в поверхностном слое по всей длине и окружности цилиндра. Интенсивность источников убывает с глубиной по экспоненциальному закону. Но расчёты показывают, что затухание мощности с глубиной настолько велико, что можно перейти к плоскому поверхностному источнику нагрева.

**Постановка задачи.** Рассматривается задача расчета температурного поля внутри полого цилиндрического тела, на внутренней поверхности которого нанесено порошковое покрытие, а внешняя поверхность нагревается равномерно рас-

пределённым по поверхности источником тепла. Торцы цилиндра теплоизолированы, внутренняя поверхность порошковой шихты также считается теплоизолированной, т.е. слой является лишь поглотителем тепла. Данный процесс описывается уравнением теплопроводности:

$$\lambda \left( T''_{rr} + \frac{1}{r} T'_{rr} \right) = \rho c T'_t, \quad (1)$$

где  $T = T(r, t)$  – функция распределения температуры;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К;  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – удельная теплоёмкость материала, Дж/кг·К;  $a = \lambda/\rho c$  – температуропроводность, м<sup>2</sup>/с.

Уравнение (1) рассматривается при следующих граничных условиях:

- ◆ на внутренней границе происходит поглощение тепла порошковым слоем:

$$T'_{r|_{r=R_1}} = \frac{\rho_n c_n}{\lambda} \delta T'_t, \quad (2)$$

где  $\delta$  – толщина порошкового покрытия;  $\rho_n$ ,  $c_n$  – плотность и теплоёмкость материала порошкового покрытия соответственно;

- ◆ на внешней границе тело нагревается плоским, равномерно распределённым по поверхности источником тепла, причём учитывается потеря тепла связанная с излучением внешней поверхностью цилиндра и за счёт теплообмена с окружающей средой:

$$-\lambda T'_{r|_{r=R_2}} = \alpha_0 T + \epsilon \sigma \left[ (T + 273)^4 - 273^4 \right] - q, \quad (3)$$

где  $\alpha_0$  – постоянный (не равный нулю или бесконечности) коэффициент теплоотдачи;  $\epsilon$  – степень черноты поверхности;  $\sigma$  – постоянная Стефана–Больцмана; и начальном условии:

$$T|_{t=0} = 0. \quad (4)$$

На рис. 1 изображен полый цилиндр со внутренним порошковым покрытием. Расчетная область заключена между внутренним ( $R_1$ ) и внешним ( $R_2$ ) радиусами.

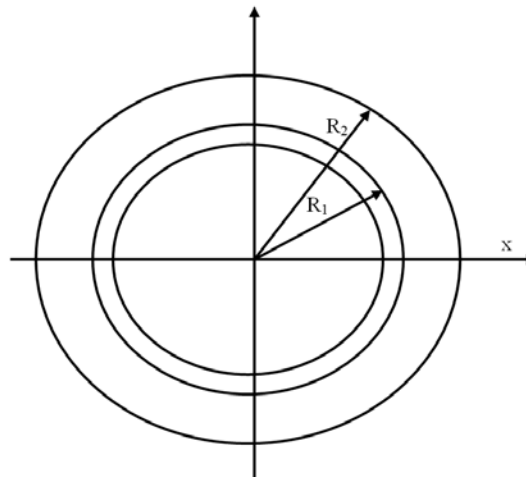


Рис. 1. Полый цилиндр со внутренним порошковым покрытием

Обе части уравнения (1) умножим на  $\Gamma$ , в результате чего получим

$$\lambda(r\Gamma'_r)'_r = r\rho c\Gamma'_t. \quad (5)$$

Далее можно переходить к построению дискретной модели.

**Построение дискретной модели.** Покроем расчетную область равномерной сеткой  $\omega_h = \omega_r \chi \omega_t$ ,

$$\omega_r = \{r_i = i \cdot h_r, i = \overline{m..M}, R_1 = m \cdot h_r, R_2 = M \cdot h_r\},$$

$$\omega_t = \{t^n = n \cdot h_t, n = \overline{1..N}, t^M = M \cdot h_t\},$$

где  $i, n$  – индексы по пространственной и временной координате соответственно;  $h_r, h_t$  – шаги по координатам  $x, t$ ;  $m$  – минимальные значения индексов,  $N, M$  – максимальные значения индексов соответственно;  $R_1, R_2$  – внутренний и внешний радиусы металлического цилиндра соответственно;  $t^M$  – время протекания процесса.

Для построения дискретной модели воспользуемся методом баланса, для этого проинтегрируем обе части уравнения (5) по области  $D: \{r_{i-1/2} \leq r \leq r_{i+1/2}, t^n \leq t \leq t^{n+1}\}$ , в результате чего получим

$$\int_{t^n}^{t^{n+1}} \int_{r_{i-1/2}}^{r_{i+1/2}} \lambda(r\Gamma'_r)'_r dr dt = \int_{t^n}^{t^{n+1}} \int_{r_{i-1/2}}^{r_{i+1/2}} r\rho c\Gamma_t dr dt. \quad (6)$$

Левая часть уравнения (6) может быть преобразована следующим образом:

$$\int_{t^n}^{t^{n+1}} \int_{r_{i-1/2}}^{r_{i+1/2}} \lambda(r\Gamma'_r)'_r dr dt \approx h_t \int_{r_{i-1/2}}^{r_{i+1/2}} \lambda(r\Gamma'_r)'_r dr \Big|_{t=t^{n+\sigma}} = h_t \left( \lambda(r\Gamma'_r)|_{r_{i+1/2}} - \lambda(r\Gamma'_r)|_{r_{i-1/2}} \right) \Big|_{t=t^{n+\sigma}}, \quad (7)$$

где  $\Gamma|_{t=t^{n+\sigma}} \equiv T^{n+\sigma} = \sigma T^{n+1} + (1-\sigma)T^{n+1}$ .

Введём обозначение:

$$W = r\Gamma'_r. \quad (8)$$

Проинтегрируем уравнение на отрезке:  $r_i \leq r \leq r_{i+1/2}$ , в результате чего получим

$$\int_{r_i}^{r_{i+1/2}} \Gamma'_r dr = \int_{r_i}^{r_{i+1/2}} \frac{W}{r} dr. \quad (9)$$

Упростим полученное выражение

$$T|_{r_i}^{r_{i+1/2}} \approx W|_{r_{i+1/2}} \int_{r_i}^{r_{i+1/2}} \frac{dr}{r}. \quad (10)$$

Выражение (10) может быть записано в следующем виде:

$$T_{i+1} - T_i \approx W|_{r_{i+1/2}} \frac{h_r}{a_{i+1}}, \quad (11)$$

где  $a_{i+1} = h_r \left( \int_{r_i}^{r_{i+1/2}} \frac{dr}{r} \right)^{-1}$ .

Таким образом, получим дискретный аналог уравнения (8):

$$W_{r_{i+1/2}} \approx a_{i+1} \frac{T_{i+1} - T_i}{h_r}. \quad (12)$$

Оценим значение  $a_{i+1}$ :

$$a_{i+1} = h_r \left( \int_{r_i}^{r_{i+1}} \frac{dr}{r} \right)^{-1} = h_r \left( \ln r \Big|_{r_i}^{r_{i+1}} \right)^{-1} = h_r \left( \ln \frac{r_{i+1}}{r_i} \right)^{-1} = \left( \frac{1}{h_r} \ln \left( 1 + \frac{h_r}{r_i} \right) \right)^{-1} \approx r_{i+1/2}.$$

Уравнение (8) с учетом полученного выражения запишется в виде

$$W_{r_{i+1/2}} \approx r_{i+1/2} \frac{T_{i+1} - T_i}{h_r}. \quad (13)$$

В силу (7), (13) дискретный аналог интеграла, записанный в левой части уравнения (6), примет вид

$$\int_{t^n}^{t^{n+1}} \int_{r_{i-1/2}}^{r_{i+1/2}} \lambda (r T_r)'_r dr dt \approx h_t \lambda \left( r_{i+1/2} \frac{T_{i+1}^{n+\sigma} - T_i^{n+\sigma}}{h_r} - r_{i-1/2} \frac{T_i^{n+\sigma} - T_{i-1}^{n+\sigma}}{h_r} \right). \quad (14)$$

Вычислим правую часть уравнения (6):

$$\begin{aligned} \int_{t^n}^{t^{n+1}} \int_{r_{i-1/2}}^{r_{i+1/2}} \rho c T'_t dr dt &\approx \rho c \int_{t^n}^{t^{n+1}} T'_t dt \int_{r_{i-1/2}}^{r_{i+1/2}} r dr \approx \rho c \int_{t^n}^{t^{n+1}} T'_t dt \Big|_{r=r_{i-1/2}}^{r_{i+1/2}} \int r dr = \\ &= \rho c (T^{n+1} - T^n) \Big|_{r=r_{i-1/2}}^{r_{i+1/2}} \left( \frac{r^2}{2} \right) = \rho c (T_i^{n+1} - T_i^n) \frac{(r_{i+1/2})^2 - (r_{i-1/2})^2}{2} = \\ &= \rho c (T_i^{n+1} - T_i^n) \frac{\left( r_i + \frac{h_r}{2} \right)^2 - \left( r_i - \frac{h_r}{2} \right)^2}{2} = \\ &= \rho c (T_i^{n+1} - T_i^n) \frac{r_i^2 + r_i h_r + \left( \frac{h_r}{2} \right)^2 - r_i^2 + r_i h_r - \left( \frac{h_r}{2} \right)^2}{2} = r_i h_r \rho c (T_i^{n+1} - T_i^n). \end{aligned} \quad (15)$$

В итоге получим аппроксимацию уравнения (5):

$$r_i h_r \rho c (T_i^{n+1} - T_i^n) = h_t \lambda \left( r_{i+1/2} \frac{T_{i+1}^{n+\sigma} - T_i^{n+\sigma}}{h_r} - r_{i-1/2} \frac{T_i^{n+\sigma} - T_{i-1}^{n+\sigma}}{h_r} \right) \quad (16)$$

или

$$r_i h_r \rho c \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{h_t} = \lambda \left( r_{i+1/2} \frac{T_{i+1}^{n+\sigma} - T_i^{n+\sigma}}{h_r} - r_{i-1/2} \frac{T_i^{n+\sigma} - T_{i-1}^{n+\sigma}}{h_r} \right). \quad (17)$$

Разделим уравнение (17) на  $h_r^2$ :

$$\rho c \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{h_t} = \lambda(i+1/2) \frac{T_{i+1}^{n+\sigma} - T_i^{n+\sigma}}{h_r^2} - \lambda(i-1/2) \frac{T_i^{n+\sigma} - T_{i-1}^{n+\sigma}}{h_r^2}. \quad (18)$$

Аппроксимируем граничное условие (2). Для этого проинтегрируем (5) по области D:  $\{r_m \leq r \leq r_{m+1/2}, t^n \leq t \leq t^{n+1}\}$ , в результате чего получим

$$\int_{t^n}^{t^{n+1}} \int_{r_m}^{r_{m+1/2}} \lambda(rT_r)'_r dr dt = \int_{t^n}^{t^{n+1}} \int_{r_m}^{r_{m+1/2}} \rho c T_t' dr dt. \quad (19)$$

Рассмотрим левую часть выражения (19):

$$\begin{aligned} \int_{t^n}^{t^{n+1}} \int_{r_m}^{r_{m+1/2}} \lambda(rT_r)'_r dr dt &= \int_{t^n}^{t^{n+1}} \left( \lambda(rT_r)'_{r_{m+1/2}} - \lambda(rT_r)'_{r_m} \right) dt = \\ &= \int_{t^n}^{t^{n+1}} \lambda(rT_r)'_{r_{m+1/2}} - \lambda r \frac{\rho_n c_n}{\lambda_n} \delta T_n' dt. \end{aligned} \quad (20)$$

В силу уравнения (17) полученное выражение приобретет вид

$$\int_{t^n}^{t^{n+1}} \int_{r_m}^{r_{m+1/2}} \lambda(rT_r)'_r dr dt \approx h_t \lambda r_{m+1/2} \frac{T_{m+1}^{n+\sigma} - T_m^{n+\sigma}}{h_r} - \lambda r_m \frac{\rho_n c_n}{\lambda_n} \delta (T_i^{n+1} - T_i^n). \quad (21)$$

Рассмотрим правую часть выражения (19):

$$\begin{aligned} \int_{t^n}^{t^{n+1}} \int_{r_m}^{r_{m+1/2}} \rho c T_t' dr dt &= \rho c \int_{t^n}^{t^{n+1}} T_t' dt \int_{r_m}^{r_{m+1/2}} r dr = \rho c (T_m^{n+1} - T_m^n) \left( \frac{r^2}{2} \Big|_{r_m}^{r_{m+1/2}} \right) = \\ &= \rho c (T_m^{n+1} - T_m^n) \frac{(r_{m+1/2})^2 - (r_m)^2}{2} = \rho c (T_m^{n+1} - T_m^n) \frac{r_m^2 + h_r r_m + \frac{h_r^2}{4} - r_m^2}{2} = \\ &= \rho c (T_m^{n+1} - T_m^n) \frac{h_r r_m + \frac{h_r^2}{4}}{2} = \rho c \frac{T_m^{n+1} - T_m^n}{2} \left( h_r r_m + \frac{h_r^2}{4} \right) = h_t \lambda r_{m+1/2} \frac{T_m^{n+1} - T_m^n}{2} - \\ &\quad - \lambda r_m \frac{\rho_n c_n}{\lambda_n} \delta (T_i^{n+1} - T_i^n). \end{aligned} \quad (22)$$

Выражение (19), с учетом (21)–(22), примет вид

$$\frac{\rho c}{2} \frac{T_m^{n+1} - T_m^n}{h_t} \left( r_m + \frac{h_r}{4} \right) = \lambda r_{m+1/2} \frac{T_{m+1}^{n+\sigma} - T_m^{n+\sigma}}{h_r^2} - \lambda r_m \frac{\rho_n c_n}{\lambda_n} \frac{\delta}{h_r} \frac{T_m^{n+1} - T_m^n}{h_t}. \quad (23)$$

Выражение (23) можно записать в следующей форме:

$$\frac{T_m^{n+1} - T_m^n}{h_t} \left( \frac{r_m \rho c}{2} + \frac{\lambda \rho_n c_n}{\lambda_n} m \frac{\delta}{h_r} + \frac{h_r}{4} \right) = \lambda r_{m+1/2} \frac{T_{m+1}^{n+\sigma} - T_m^{n+\sigma}}{h_r^2}. \quad (24)$$

Разделим выражение (24) на  $h_t \rho c$ , получим

$$\frac{T_m^{n+1} - T_m^n}{h_t} \left( \frac{m}{2} + \frac{1}{8} + m \frac{\lambda \rho_n c_n}{\lambda_n \rho c} \frac{\delta}{h_r} \right) = \frac{\lambda}{\rho c} (m+1/2) \frac{T_{m+1}^{n+\sigma} - T_m^{n+\sigma}}{h_r^2}. \quad (25)$$

Аппроксимируем граничное условие (3)

Проинтегрируем (5) по области:  $r_{M-1/2} \leq r \leq r_M$ ,  $t^n \leq t \leq t^{n+1}$ .

$$\int_{t^n}^{t^{n+1}} \int_{r_{M-1/2}}^{r_M} \lambda(rT_r)'_r dr dt = \int_{t^n}^{t^{n+1}} \int_{r_{M-1/2}}^{r_M} \rho c T_t' dr dt. \quad (26)$$

Вычислим интеграл, стоящий в левой части (26), с учётом граничного условия (3), в результате чего получим

$$\begin{aligned} & \int_{t^n}^{t^{n+1}} \int_{r_{M-1/2}}^{r_M} \lambda(rT_r)'_r dr dt \approx h_t \int_{t^n}^{t^{n+1}} \lambda(rT_r)'_{r_{M-1/2}} dt = \\ & = \int_{t^n}^{t^{n+1}} -r_M \alpha T - r_M \varepsilon \sigma \left[ (T + 273)^4 - 273^4 \right] + r_M q - \lambda(rT_r)'_{r_{M-1/2}} dt = \\ & = h_t \left\{ -r_M \alpha T^{n+\sigma} - r_M \varepsilon \sigma \left[ (T^n + 273)^4 - 273^4 \right] + r_M q - \lambda r_{M-1/2} \frac{T_M^{n+\sigma} - T_{M-1}^{n+\sigma}}{h_r} \right\}. \quad (27) \end{aligned}$$

Интеграл, стоящий в правой части уравнения (26), можно записать в виде

$$\begin{aligned} & \int_{t^n}^{t^{n+1}} \int_{r_{M-1/2}}^{r_M} \rho c T_t' dr dt = \rho c \int_{t^n}^{t^{n+1}} T_t' dt \int_{r_{M-1/2}}^{r_M} r dr = \\ & = \rho c (T_M^{n+1} - T_M^n) \frac{r^2}{2} \Big|_{r_{M-1/2}}^{r_M} = \rho c (T_M^{n+1} - T_M^n) \frac{(r_M)^2 - (r_{M-1/2})^2}{2} = \\ & = \rho c (T_M^{n+1} - T_M^n) \frac{h_r r_M - \frac{h_r^2}{4}}{2}. \quad (28) \end{aligned}$$

В итоге получим аппроксимацию граничного условия (3):

$$\begin{aligned} & \frac{-\alpha T^{n+\sigma} M - \varepsilon \sigma \left[ (T^n + 273)^4 - 273^4 \right] M + qM}{h_r} - \lambda (M - 1/2) \frac{T_M^{n+\sigma} - T_{M-1}^{n+\sigma}}{h_r^2} = \\ & = \rho c \frac{T_M^{n+1} - T_M^n}{h_t} \left( \frac{M}{2} - \frac{h_r}{8} \right). \quad (29) \end{aligned}$$

Таким образом, получим дискретную модель, соответствующую непрерывной задаче (1)–(4):

$$\begin{aligned} i = m: & \quad \frac{T_m^{n+1} - T_m^n}{h_t} \left( \frac{m}{2} + \frac{1}{8} + m \frac{\lambda \rho_n c_n \delta}{\lambda_n \rho c h_r} \right) = \frac{\lambda}{\rho c} (m + 1/2) \frac{T_{m+1}^{n+\sigma} - T_m^{n+\sigma}}{h_r^2}, \\ m < i < M: & \quad i \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{h_t} = \frac{\lambda}{\rho c} \left[ (i + 1/2) \frac{T_{i+1}^{n+\sigma} - T_i^{n+\sigma}}{h_r^2} - (i - 1/2) \frac{T_i^{n+\sigma} - T_{i-1}^{n+\sigma}}{h_r^2} \right], \quad (30) \\ i = M: & \quad \frac{T_M^{n+1} - T_M^n}{h_t} \left( \frac{M}{2} - \frac{h_r}{8} \right) = -\frac{\lambda}{\rho c} (M - 1/2) \frac{T_M^{n+\sigma} - T_{M-1}^{n+\sigma}}{h_r^2} + \\ & \quad + \frac{-\alpha T^{n+\sigma} M - \varepsilon \sigma \left[ (T^n + 273)^4 - 273^4 \right] M + qM}{\rho c h_r}. \end{aligned}$$

Система уравнений (30) решалась методом прогонки [2].

Исследование устойчивости [1–4] показало, что математическая модель индукционного нагрева полого цилиндра, безусловно, устойчива и имеет место оценка решения:

$$\|T^n\| \leq \frac{Q}{\alpha} + \|T^0\|.$$

**Результаты численных экспериментов.** В результате получены зависимости температурных полей (рис.2) от времени для полого цилиндра из стали 45 со внутренним порошковым покрытием при различных коэффициентах теплоотдачи  $\alpha_0 = 20, 50, 100 \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К}$ ;  $R_1 = 0,024 \text{ м}$ ,  $R_2 = 0,04 \text{ м}$  – внутренний и внешний радиусы соответственно; мощность источника  $q = 1 \times 10^5 \text{ Вт/м}^2$ , после достижения точки юри ( $770 \text{ }^\circ\text{C}$ ), падает до  $q = 1 \times 10^3 \text{ Вт/м}^2$ ;  $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_n = 2492 \text{ кг/м}^3$  – плотности цилиндра и порошка соответственно;  $c = 700 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$ ,  $c_n = 960 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$  – теплоёмкости цилиндра и порошка;  $\lambda = 50 \text{ Дж/м} \cdot \text{с} \cdot \text{К}$  – теплопроводность металла.

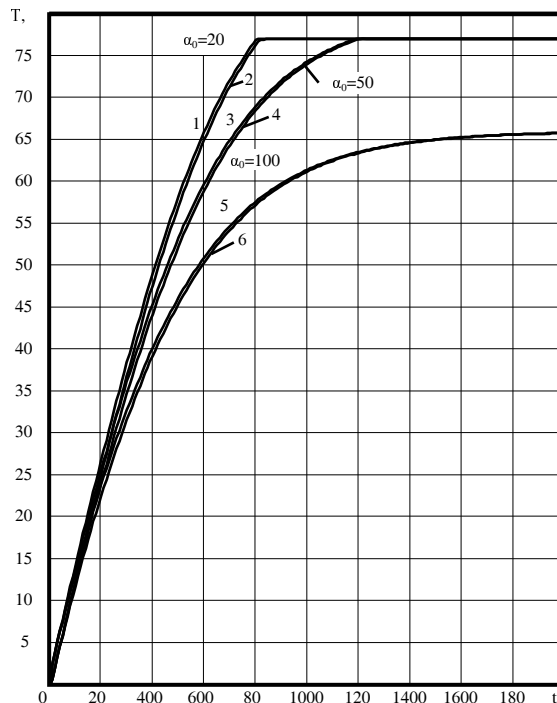


Рис. 2. Температурное поле на внешней (кривые – 1,3,5) и внутренней (кривые – 2,4,6) границе полого металлического цилиндра при различных коэффициентах теплоотдачи  $\alpha_0$

Из графика видно, что излучение на начальном этапе играет малую роль (практически прямолинейная кривая до  $450 \text{ }^\circ\text{C}$ ), затем график начинает искривляться, указывая на то, что с увеличением температуры мощность теплового излучения растет, тем самым замедляя нагрев цилиндра, и в итоге процесс устанавливается. Так же большую роль играет интенсивность теплообмена с окружающей средой – чем выше коэффициент теплоотдачи  $\alpha_0$ , тем медленнее происходит нагрев цилиндра. Данные хорошо согласуются с аналитическим решением [7], благодаря полученному дроблению временного интервала нагрева на участки, с последующей их линеаризацией.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1989.
2. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. – М.: Наука, 1978.
3. Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Алексеенко Е.В. Численная реализация трехмерной модели гидродинамики для мелководных водоемов на супервычислительной системе // Математическое моделирование. – 2011. – Т. 23, № 3. – С. 3-21.
4. Чистяков А.Е. Трехмерная модель движения водной среды в Азовском море с учетом транспорта солей и тепла // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 8 (97). – С. 75-82.
5. Жорник В.А. Прокопенко Ю.А. Моделирование процесса разрушения двухслойных цилиндров при тепловом воздействии // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 6 (107). – С. 154-167.
6. Жорник В.А. Прокопенко Ю.А. Моделирование процесса нанесения стеклянных покрытий на внутренние поверхности металлических труб // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 6 (107). – С. 215-221.
7. Кихтенко С.Н., Жорник А.И., Дорожкин Н.Н., Кашицин Л.П., Павленко А.В. Способ линеаризации тепловой задачи при индукционном нагреве цилиндра // Сборник научных трудов. «Математические модели физических процессов и их свойства». – Таганрог: Изд-во ТГПИ, 2001. – С. 74-77.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

**Жорник Александр Иванович**

ГОУ ВПО «Таганрогский государственный педагогический институт».

E-mail: zhornik\_victoria@mail.ru.

347936, г. Таганрог, ул. Инициативная, 48.

Тел.: 88634601807.

Д.ф.-м.н.; профессор.

**Прокопенко Юрий Александрович**

E-mail: uranum83@mail.ru.

Ассистент.

**Чистяков Александр Евгеньевич**

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: cheese\_05@mail.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский 44.

Тел.: 88634371606.

Кафедра высшей математики; ассистент.

**Zhornik Aleksandr Ivanovich**

Taganrog State pedagogical Institute.

E-mail: zhornik\_victoria@mail.ru.

48, Inicativnaya Street, 347936, Taganrog.

Phone: +78634601807.

Dr. of Phis.-Math. Sc.; Professor.

**Prokopenko Yury Aleksandrovich**

E-mail: uranum83@mail.ru.

Assistant.

**Chistyakov Alexander Evgenjevich,**

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928

E-mail: cheese\_05@mail.ru

Phone: +78634371606.

The Department of Higher Mathematics; Assistant.