

*In this paper we develop motion laws and kinematic parameters properties of 4R linkage active link points. Equations and calculation of motion, velocity and acceleration of the 4R linkage specific points are presented.*

**Keywords:** spatial 4R linkage, linkage kinematics, direction cosines, mixing, specific points.

Получено 31.05.14

УДК 536.24: 519.63

**С. С. Макаров**, кандидат технических наук, доцент, Институт механики УрО РАН, Ижевск

**К. Э. Чекмышев**, аспирант, Институт механики УрО РАН, Ижевск

**С. Н. Храмов**, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

**Е. В. Макарова**, кандидат технических наук, доцент, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ЗАКАЛКЕ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК \*

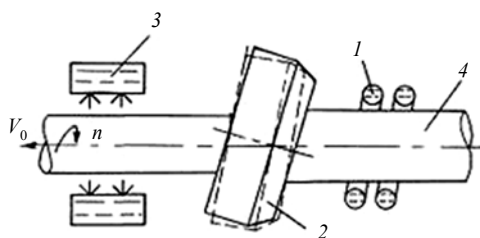
*Приводятся результаты математического моделирования охлаждения осесимметричной металлической заготовки из конструкционной стали квазистационарными потоками охлаждающей среды. Дается математическое описание решения задачи конвективного теплообмена при охлаждении водой и воздухом. Анализируются результаты численных расчетов параметров теплообмена в зависимости от геометрии, теплофизических свойств веществ и времени процесса.*

**Ключевые слова:** математическая модель, охлаждение, осесимметричная металлическая заготовка, параметры теплообмена, квазистационарный поток, численный расчет.

При изготовлении металлических осесимметричных заготовок деталей машиностроения, таких как трубы, валы, оси, втулки, пальцы, пружины и т. д., применяют эффективные упрочняющие технологии термической обработки. В работах В. Д. Садовского, М. Л. Берштейна, А. Г. Рахштадта, В. Ф. Жадана, О. И. Шаврина, В. Б. Дементьева получены научные результаты, позволяющие улучшить комплекс физико-механических свойств материала заготовок, существенно снизить металлоемкость продукции, а также использовать стали для ответственных отраслей техники, не содержащие остродефицитных легирующих элементов. На рис. 1, а приведена классическая схема упрочнения осесимметричных заготовок [1]. Суть процесса заключается в последовательном нагреве заготовки токами высокой частоты до температуры аустенизации, дефор-

мации в трех неприводных роликах на оправке при принудительном перемещении и охлаждении в спрейерном устройстве. Практически отработана технология изготовления осесимметричных заготовок ответственных деталей из конструкционных сталей марок 40, 40Х, 9Х, 60С2, 30ХГСА, 30ХГСНА и т. д., наружный диаметр которых 0,012...0,06 м (рис. 1, б).

Технология упрочнения осесимметричных заготовок включает этап охлаждения. Приоритетными задачами на данном этапе являются научные исследования, включающие разработку и совершенствование конструкции охлаждающих устройств, а также режимов подачи охлаждающих сред. Для осесимметричных заготовок широкое применение нашли струйные устройства, например, радиально многосопловой спрейер [2] (рис. 2, а), осевой спрейер с коническими соплами [3] (рис. 2, б).



а



б

Рис. 1. Схема упрочнения осесимметричных заготовок: а – классическая схема (1 – индуктор; 2 – деформирующие ролики; 3 – спрейер; 4 – заготовка); б – осесимметричные заготовки

© Макаров С. С., Чекмышев К. Э., Храмов С. Н., Макарова Е. В., 2014

\* Работа выполнена при поддержке Программы научных проектов молодых ученых и аспирантов УрО РАН на 2014 г. (проект № 14-1-НП-1).

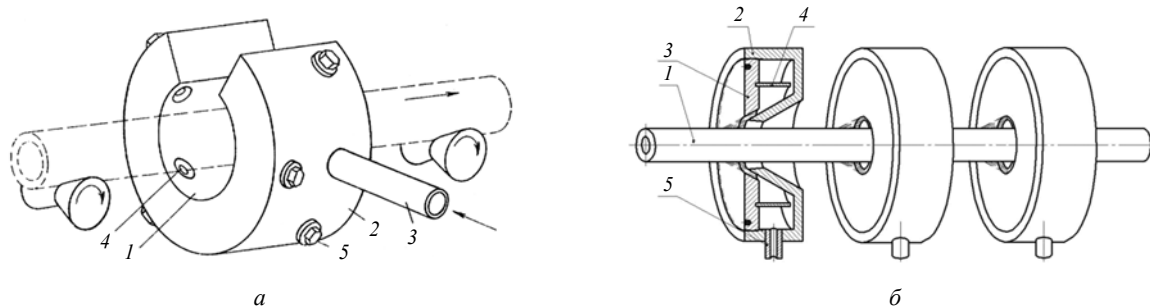


Рис. 2. Конструкция спрейеров: а – 1 – внутренняя стенка; 2 – внешняя стенка; 3 – патрубок; 4 – форсунки; 5 – пробки; б – 1 – заготовка; 2 – корпус; 3 – крышка; 4 – распределительное кольцо; 5 – штанцер

Для охлаждения осесимметричных заготовок в большинстве случаев применяют спрейеры с осевым типом подвода закалочной среды. Подвод осуществляется под углом 10...20° к поверхности заготовки через щелевой канал. В [4] отмечается, что данный вид спрейерных устройств обеспечивает равномерное натекание сплошного потока закалочной среды на поверхность заготовки и, следовательно, более равномерную структуру и однородность свойств материала, чем при использовании радиальных спрейерных устройств.

В работе [5] отмечается, что практическое применение потока воды, направленного параллельно закалываемой поверхности, обеспечивает более равномерное охлаждение по сравнению с подачей воды через радиальный многосопловой спрейер (водяной душ). В работе [6] приводится сопоставительный анализ душевого способа и охлаждения в быстродвижущемся потоке воды. Показано, что применение струйного охлаждения способствует интенсификации процесса, однако тонкие струйки воды при падении на нагретую поверхность приводят к местному точечному охлаждению заготовок. Неоднородность распределения коэффициентов теплоотдачи при контакте локальных струй с поверхностью заготовки может привести к появлению микротрещин. Поэтому лучшие результаты по равномерности охлаждения осесимметричных изделий (валов, осей и т. д.) получаются при охлаждении продольным водяным потоком. Применение осевых спрейеров позволяет создавать одинаковые условия охлаждения по периметру заготовки за счет равномерного и симметричного подвода закалочной среды к поверхности, а также дополнительной возможности создания поступательно-вращательного движения системы «спрейер – заготовка» [7].

При закалочном упрочнении осесимметричных заготовок деталей ответственного назначения из конструкционных марок сталей рекомендуется диапазон критических скоростей охлаждения от 30 до 120 °С/сек. [8]. Такой диапазон значений скоростей охлаждения в спрейерах может быть получен при использовании нескольких охлаждающих сред – воды, воздуха, смеси воды и воздуха.

Как показывает практика применения воды в качестве закалочной среды, для более эффективного процесса упрочнения заготовок и во избежание появления закалочных трещин рекомендуется исполь-

зовать воду с температурой в диапазоне 15...30 °С. В работе [9] отмечается, что при снижении температуры возможно повышение тепловых напряжений, вызывающее увеличение короблений, а повышение температуры снижает скорость отвода тепла, приводящее к увеличению времени охлаждения.

В работе [10] предложено различать две области закалочного охлаждения при использовании направленного движения потока воды. Для первой области доминирующее значение имеет турбулентный конвективный теплообмен, обусловленный вынужденным движением жидкости, а влияние парообразования практически не сказывается. В пределах этой области коэффициент теплоотдачи определяется по формулам конвективного теплообмена. Во второй области теплообмен обусловлен в основном процессом кипения.

Границы областей предлагается определять в соответствии с неравенством [10]

$$q/(r\rho''V)(\rho''/\rho')^{1,45} \left( r/(c_p T_s) \right)^{0,33} \leq K_a, \quad (1)$$

где  $q$  – удельный тепловой поток;  $r$  – удельная теплота парообразования;  $\rho'', \rho'$  – плотность пара и воды;  $V$  – скорость потока воды;  $c_p$  – удельная теплоемкость воды;  $T_s$  – температура насыщения;  $K_a = 0.4 \cdot 10^{-5}$  – приведенный комплекс. Если выполняется условие (1), то в процессе теплообмена доминирующее значение имеет конвективный теплообмен однофазной среды.

Зависимости параметра  $K_a$  от скорости потока воды  $V$  для режимов охлаждения стальных заготовок при  $q_1 \approx 2,0$  МВт/м<sup>2</sup> (кривая 1) и  $q_2 \approx 3,0$  МВт/м<sup>2</sup> (кривая 2) приведены на рис. 3, если выражение (1) использовать как равенство.

На практике избыточное давление гидравлической системы спрейерного охлаждения обычно имеет величину порядка  $p_{из} = 4$  атм., что соответствует скорости истечения воды  $V = \sqrt{2p_{из}/\rho} \approx 30$  м/с. Задаваясь теплофизическими параметрами воды и водяного пара согласно [11], получим решение для выражения (1) в виде  $K_{a1}$  (кривая 1),  $K_{a2}$  (кривая 2) – значения левой части и прямой 3 – постоянное значение приведенного комплекса.

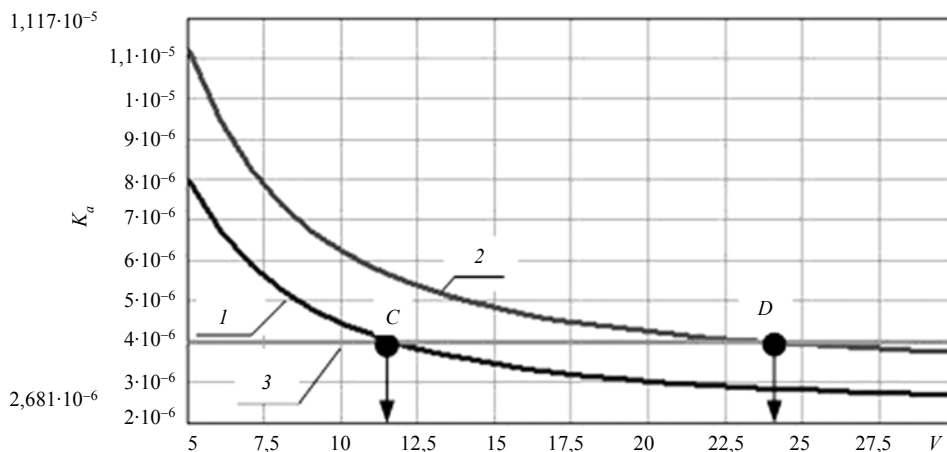


Рис. 3. Границы режимных областей: 1 –  $K_{a1}$  при  $q_1 \approx 2,0$  МВт/м<sup>2</sup>; 2 –  $K_{a2}$  при  $q_2 \approx 3,0$  МВт/м<sup>2</sup>

Пересечение кривых 1 и 2 и прямой 3 происходит при  $V_1 \approx 12$  м/с и  $V_2 \approx 24$  м/с. Это означает, что при скоростях, равных или больших полученных значений, коэффициент теплоотдачи определяется по формулам конвективного теплообмена в соответствии с выражением [10]

$$\alpha = 0,0356 \frac{\lambda_l}{l} Re^{0,8} Pr^{0,4}, \tag{2}$$

где  $\lambda_l$  – коэффициент теплопроводности среды;  $Re = Vl/\nu$  – число Рейнольдса;  $l$  – протяженность участка охлаждения,  $\nu$  – кинематическая вязкость;  $Pr$  – число Прандтля.

Для потока воздуха коэффициент теплоотдачи удовлетворяет равенству [12]

$$\alpha = 0,032 \frac{\lambda_l}{l} Re^{0,8}. \tag{3}$$

На рис. 4 приведены результаты расчета величин коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  по формулам (2) и (3) при условии постоянства теплофизических параметров воды и воздуха для температуры  $T_l = 20$  °С. Значения скорости потока в диапазоне  $V = 0 \dots 30$  м/с и протяженность участка охлаждения составляет  $l = 0 \dots 0,5$  м.

Видно, что как для воды, так и для воздуха увеличение интенсивности теплоотдачи происходит с ростом скорости течения потока, и снижение интенсивности наблюдается по мере протяженности участка охлаждения.

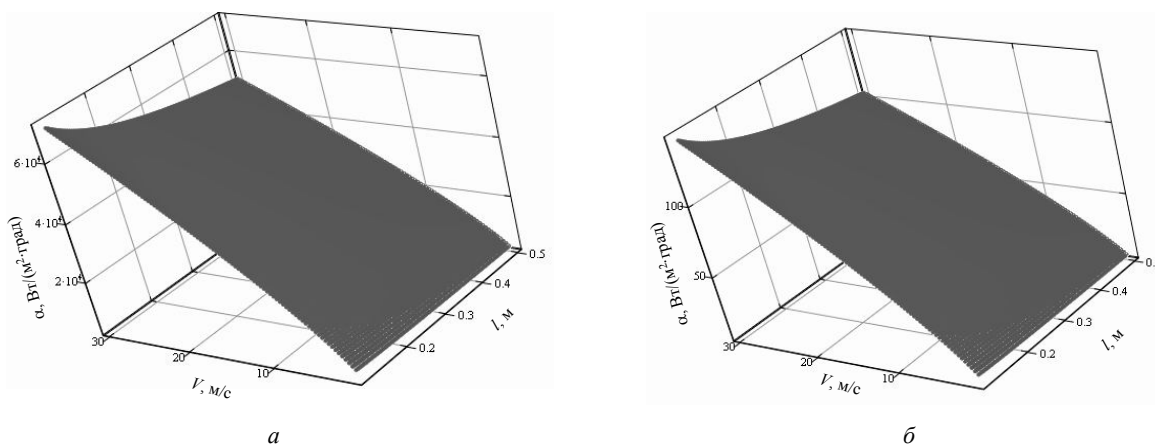


Рис. 4. Значения коэффициентов теплоотдачи: а – вода; б – воздух

При высоких температурах, особенно на начальных стадиях процесса охлаждения, существенный вклад в интенсивность теплосъема вносит излучение высокотемпературных заготовок. В этом случае коэффициент теплоотдачи  $\alpha_\Sigma$  с поверхности заготовки рассчитывается как сумма  $\alpha_\Sigma = \alpha + \alpha'$  конвективного коэффициента  $\alpha$ , рассчитываемого по уравнениям (2), (3), и коэффициента теплоотдачи излучением  $\alpha'$ , который определяется так:

$$\alpha' = \frac{\sigma_0 \epsilon (T_m^4 - T_i^4)}{(T_m - T_i)}, \tag{4}$$

где  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>) – постоянная Стефана – Больцмана;  $\epsilon$  – степень черноты поверхности заготовки;  $T_m, T_i$  – температуры поверхности и охлаждающего потока среды в расчетных точках по длине заготовки (считаются по шкале Кельвина).

**Математическая модель охлаждения осесимметричных металлических заготовок квазистационарными потоками воды и воздуха**

В работе [13] приведен численный алгоритм решения задачи охлаждения потоком воды и воздуха высокотемпературного сплошного металлического цилиндра. На рис. 5 приведена расчетная схема сплошного металлического цилиндра, охлаждаемого продольно движущимся в направлении оси  $x$  потоком среды, находящимся между радиусами  $r_m$  и  $r_l$ .

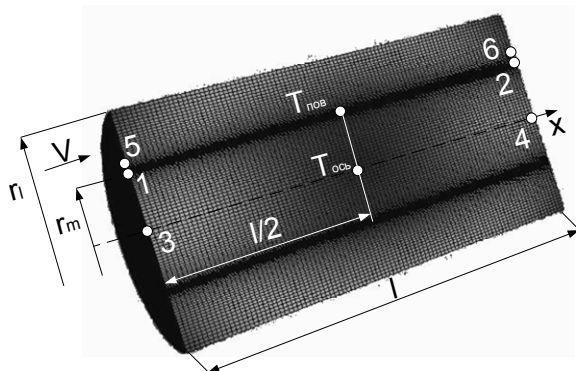


Рис. 5. Расчетная схема «металлический цилиндр – охлаждающая среда»: первая и последняя расчетные точки: 1, 2 – по поверхности заготовки; 3, 4 – на оси заготовки; 5, 6 – точки жидкости по длине заготовки

Система уравнений для потока сжимаемой жидкости

– уравнение состояния:  $p = \rho_l R T_l$ ; (5)

– уравнение неразрывности:  $F \rho_l V = \text{const}$ .

Принимая  $F = \text{const}$ , получим  $\rho_l V = \text{const}$ , и, обозначая  $\rho_l V = a$ , запишем уравнение движения в виде

$$\frac{di}{dx} = -\frac{\Pi \tau}{F}; \quad (6)$$

– уравнение энергии:  $\frac{d\Theta}{dx} = \frac{\Pi \alpha (T_m - T_l)}{Fa}$ ; (7)

– скорость газового потока:

$$V = \frac{\frac{k-1}{k+1} 2\Theta a}{\frac{ki}{(k+1)} + \sqrt{\frac{k^2 i^2}{(k+1)^2} - \frac{k-1}{k+1} 2\Theta a^2}}, \quad (8)$$

где  $p$  – давление;  $\rho_l$  – плотность среды;  $R$  – удельная газовая постоянная;  $F$  – площадь поперечного сечения потока;  $\Pi$  – смоченный периметр поперечного сечения потока;  $\tau$  – напряжение трения;  $k$  – показатель адиабаты;  $\Theta = \frac{V^2}{2} + \frac{k}{k-1} \frac{p}{\rho}$  – энергия;  $i = aV + p$  – приведенный параметр;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи.

Система уравнений для потока несжимаемой жидкости

– уравнение движения:  $\frac{dp}{dx} = -\frac{\Pi \tau}{F}$ ; (9)

– уравнение энергии:

$$\frac{dT_l}{dx} = \frac{\Pi}{c_l F} \left( \frac{\tau}{\rho_l} + \frac{\alpha (T_m - T_l)}{a} \right), \quad (10)$$

где  $c_l$  – удельная теплоемкость несжимаемой жидкости.

Значение потерь давления на преодоление трения для потока среды, движущийся по охлаждаемой поверхности заготовки, может быть определено как

$$\tau = c_f \frac{\rho V^2}{2},$$

где  $\frac{c_f}{2} = \frac{0,332}{\text{Re}_x^{0,5}}$  – коэффициент трения для ламинарного режима течения;

$\frac{c_f}{2} = \frac{0,029}{\text{Re}_x^{0,2}}$  – коэффициент трения для турбулентного режима течения;

$\text{Re}_x = Vx/\nu$  – значение числа Рейнольдса,  $x \in [0, l]$ ;

критическое значение числа  $\text{Re}_{кр} = 10^6$  [14].

Распределение температуры в цилиндре при условии симметрии относительно продольной оси  $x$  описывается дифференциальным уравнением теплопроводности Био – Фурье:

$$\frac{\partial}{\partial t} c \rho_l T = \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right). \quad (11)$$

Здесь  $t$  – время процесса;  $r, x$  – пространственные координаты, вдоль которых рассматривается процесс теплопроводности; теплофизические характеристики материала цилиндра:  $c$  – удельная массовая теплоемкость;  $\rho_l$  – плотность;  $\lambda$  – теплопроводность;  $T$  – температура.

Начальные условия для заготовки:  $T(x, r, 0) = T_m$  при  $x \in [0, l]$ ,  $r \in [0, r_m]$ .

Краевые условия:  $\frac{\partial T_m}{\partial x} = 0$  при  $x = 0, x = l$ ;

$\alpha (T_m - T_l) = -\lambda \frac{\partial T_m}{\partial r}$  при  $r = r_m$ ;  $\frac{\partial T_m}{\partial r} = 0$  при  $r = 0$ .

Начальные условия для потока:  $T(x, r, 0) = T_l$ ,  $V(x, r, 0) = V_0$  при  $x \in [0, l]$ ,  $r \in [r_m, r_l]$ . Краевые условия:

$T_l = T_{l0}$  при  $x = 0$ ;  $\frac{\partial T_l}{\partial x} = 0$  при  $x = l$ ;  $\frac{\partial T_l}{\partial r} = 0$

при  $r = r_l$ .

**Последовательность решения численного алгоритма**

При начальных условиях решаются уравнения двумерной нестационарной задачи теплопроводности

сти (11), как это показано в [15]. В качестве граничных условий «жидкость – поверхность заготовки» берется коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ , значение которого задается для каждого шага интегрирования по времени и продольной координаты  $x$  решением уравнения для воды (2) или для воздуха (3) с учетом (4). Температура сред вдоль поверхности охлаждения  $T_l$  находится решением уравнений (5), (8) для воздуха и уравнений (9) и (10) для воды, в которых  $T_m = f(x, t)$  и  $T_l = f(x, t)$ , как это показано в работе [13]. Дифференциальные уравнения решаются методом Рунге – Кутты четвертого порядка с автоматическим выбором шага интегрирования.

### Результаты численных расчетов

Рассмотрим охлаждение осесимметричной заготовки. Заготовка из стали 30ХГСА диаметром 20 мм, длиной 200 мм, с начальной температурой под за-

калку  $T_m = 950^\circ\text{C}$  охлаждается потоком воды температурой  $T_l = 20^\circ\text{C}$ , площадь поперечного сечения потока  $F = 2,17 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ , со скоростью 12 м/с. Расчетное время  $t = 10 \text{ с}$ , шаг по времени  $\Delta t = 0,017 \text{ с}$ . Теплофизические свойства воды и воздуха приняты согласно [11], а стали – согласно [16]. Значения температур для расчетных точек, обозначенных на рис. 5, приведены на рис. 6.

Рассмотрим возможность закалки заготовки при заданных условиях движения потоков сред и параметрах охлаждения.

На рис. 7 приведено температурное поле металлической заготовки, охлаждаемой потоком воды, и значения скорости охлаждения заготовки в двух контрольных точках. Расчетное время  $t = 10 \text{ с}$ , шаг по времени  $\Delta t = 0,017 \text{ с}$ .

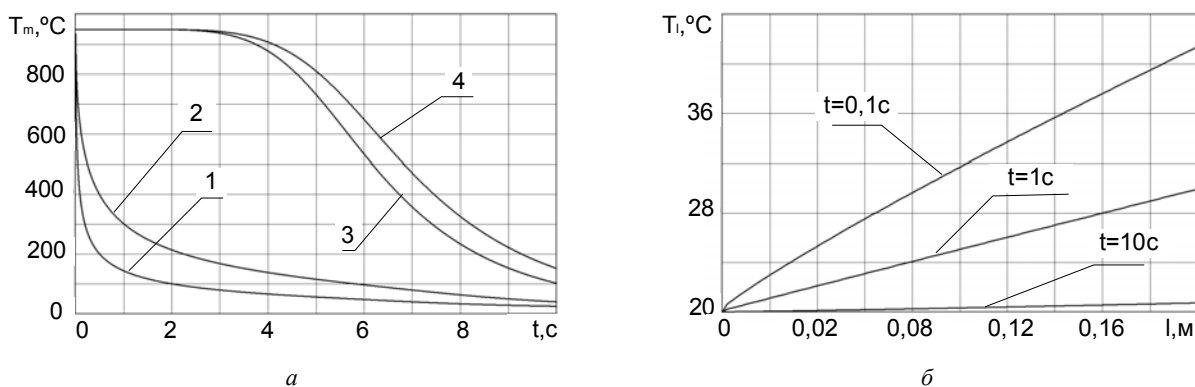
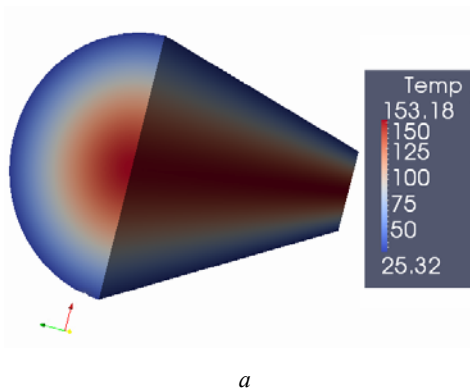
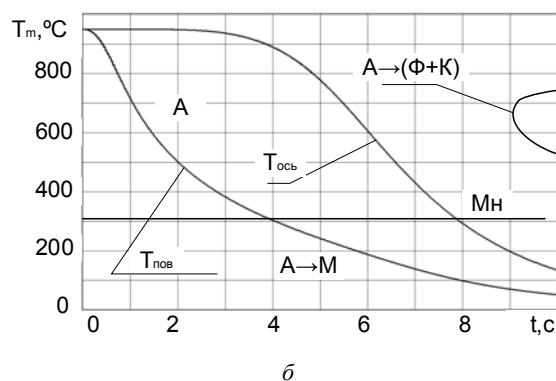


Рис. 6. Температура металлической заготовки и воды:

*a* – температура расчетных точек заготовки; *b* – температура потока воды при времени охлаждения  $t$



*a*



*b*

Рис. 7. Температура металлической заготовки, охлаждаемой потоком воды: *a* – температурное поле «заготовка – вода»; *b* – температура в центре по длине заготовки ( $T_{\text{пов}}$  – на поверхности и  $T_{\text{ось}}$  – на оси)

Видно, что скорость охлаждения, как на поверхности, так и в центре на оси заготовки, много больше критической скорости охлаждения при закалке данной стали. Следовательно, можно считать, что при заданных условиях охлаждения заготовка закаливается на мартенсит.

На рис. 8 приведено температурное поле металлической заготовки, охлаждаемой потоком воздуха со скоростью 12 м/с, и значения скорости охлажде-

ния заготовки в двух контрольных точках. Расчетное время  $t = 100 \text{ с}$ , шаг по времени  $\Delta t = 0,017 \text{ с}$ .

Видно, что скорость охлаждения, как на поверхности, так и в центре на оси заготовки, много меньше критической скорости охлаждения при закалке данной стали. Следовательно, при заданных условиях охлаждения потоком воздуха скорость охлаждения недостаточно велика. Закалка заготовки не происходит.

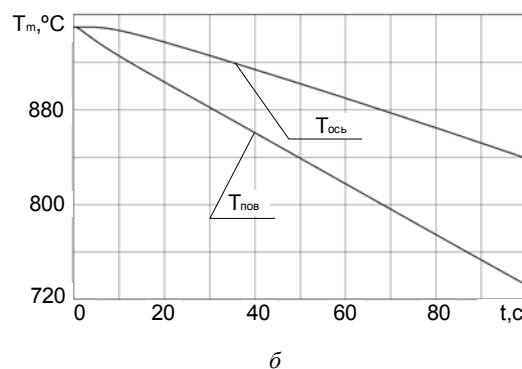
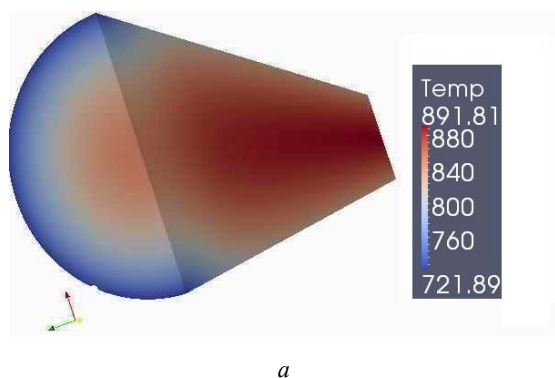


Рис. 8. Температура металлической заготовки, охлаждаемой потоком воздуха: а – температурное поле «заготовка – воздух»; б – температура в центре по длине заготовки ( $T_{пов}$  – на поверхности и  $T_{ось}$  – на оси)

**Заключение**

Приведенные в статье математическая модель процесса охлаждения и результаты математического моделирования охлаждения высокотемпературной осесимметричной металлической заготовки из стали 30ХГСА квазистационарными потоками охлаждающей среды могут быть применены для решения широкого круга задач металлургии и машиностроения. Например, для расчета параметров закалочного охлаждения других марок стали в зависимости от геометрии, теплофизических свойств веществ и времени процесса при высокотемпературной термомеханической обработке (ВТМО) или иных технологических операциях охлаждения.

**Библиографические ссылки**

1. Качество поверхности цилиндрических изделий с термомеханическим упрочнением / О. И. Шаврин, В. Б. Дементьев, Л. Н. Маслов, А. Д. Засыпкин. – Ижевск : ИПМ УРО РАН, 2006. – 178 с.
- 2 А. с. 692868 СССР, М. Кл.<sup>2</sup> С 21 D 1/02. Спрейер для охлаждения профильных изделий / Ю. П. Гуль, А. Ф. Сиухин, Ю. А. Клошник [и др.]. – № 2519711/22–02 ; заявл. 30.08.77 ; опубл. 25.10.79, Бюл. № 39. – 3 с. : ил.
3. А. с. 196072 СССР, МПК С 21 D 1/62. Щелевой спрейер для непрерывной закалки труб / Г. Н. Хейфец, З. И. Ланге, В. М. Янковский [и др.]. – № 947116/22–1 ; заявл. 11.03.65 ; опубл. 16.05.67, Бюл. № 11. – 3 с. : ил.
4. Металловедение и термическая обработка стали : справочное пособие : в 3 т. – Т. 3. Термическая обработка металлопродукции / под ред. М. Л. Бернштейна, А. Г. Рахштадта. – М. : Металлургия, 1983. – 216 с.
5. Шепяликовский К. З. Упрочнение деталей машин поверхностной закалкой при индукционном нагреве. – М. : Машиностроение, 1972. – 288 с.

6. Головин Г. Ф., Замятин М. М. Высоочастотная термическая обработка. Вопросы металловедения и технологии. – Л. : Машиностроение, 1990. – 239 с.
7. Усов В. А. Методы ускоренного охлаждения для термического и термомеханического упрочнения труб : дис. ... канд. техн. наук. – Тольятти, 2002. – 126 с.
8. Четкарев В. А., Дементьев В. Б., Запасов С. В. Расчет и оптимизация параметров охлаждения при упрочнении трубных заготовок // Гидрогазодинамика течений с тепло- и массообменом. – Ижевск : ИМИ, 1988. – Вып. 2. – С. 133–137.
9. Петраш Л. В. Закалочные среды. – М. ; Л. : Машгиз, 1959. – 112 с.
10. Кадинова А. С., Хейфец Г. Н., Тайц Н. Ю. О характере теплообмена при струйном охлаждении // Инженерно-физический журнал. – 1963. – Т. VI. – № 4. – С. 46–50.
11. Вукалович М. П. Теплофизические свойства воды и водяного пара. – М. : Машиностроение, 1967. – 160 с.
12. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. – М. : Энергия, 1977. – 344 с.
13. Липанов А. М., Макаров С. С. Численное решение задачи охлаждения потоком воды и воздуха высокотемпературного сплошного металлического цилиндра // Машиностроение и инженерное образование. – 2014. – № 1. – С. 36–41.
14. Юдаев Б. Н. Теплообмен при взаимодействии струй с преградами. – М. : Машиностроение, 1977. – 247 с.
15. Липанов А. М., Макаров С. С. Численное решение задачи охлаждения высокотемпературного сплошного металлического цилиндра // Машиностроение и инженерное образование. – 2012. – № 4. – С. 33–40.
16. Стали и сплавы. Марочник / под ред. В. Г. Сорокина, М. А. Гервасьева. – М. : Интернет Инжиниринг, 2001. – 608 с.

S. S. Makarov, PhD in Engineering, Associate Professor, Institute of Mechanics of the Ural Branch of RAS, Izhevsk  
 K. E. Chekmyshev, Post-graduate, Institute of Mechanics of the Ural Branch of RAS, Izhevsk  
 S. N. Khranov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University  
 E. V. Makarova, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

**Mathematical Modeling of Cooling During Quenching of Axially Symmetric Metal Blanks**

Mathematical modeling results of the cooling axially symmetric blank from construction steel by quasi-stationary cooling medium flows are presented in this paper. The mathematical description is given for solving problem of convective heat transfer at cooling by water and air. The results of numerical calculations of heat transfer parameters depending on the geometry, thermo-physical properties of materials and process time are analyzed.

**Keywords:** mathematical model, cooling, axially symmetric blank, heat transfer parameters, quasi-stationary flow, numeric computation.

Получено 04.06.14