РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ И ОХЛАЖДЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ОТЛИВОК ТИПА ШАР В СУХИХ ФОРМАХ

Юрин Ю.М.

Нижегородский государственный технический университет, Нижний Новгород, e-mail: Jumagavrilov@yandex.ru

В литейной практике на этапе эскизной проработки технологии приходится решать вопросы о продолжительности затвердевания и охлаждения отливок в форме. Предельно простой и оперативный способ расчета основан на использовании номограмм [1–4].

В данной статье представлены формулы (вывод в монографии [4]) для расчета времени отвода теплоты перегрева $\tau_п$, скорости $d\xi_L/d\tau$, $d\xi_S/d\tau$ и времени τ_L, τ_S продвижения фронтов ликвидуса и солидуса соответственно на заданную глубину, времени охлаждения $\tau_{охл}$ до заданной температуры и длительность $\tau_{ф.пр}$ фазового превращения стальных отливок типа шар в сухих формах:

$$\tau_п = \frac{3(n+3)}{n}\cdot\frac{K_п\beta}{a_{фп}\delta T}\left(\frac{R}{3}\right)^2\Bigg[D_3 - D_6 - D_7 - D_{10} - \frac{1}{6}B_6\times$$

$$\times\ln\left|\frac{(D_4+D_3B_6+B_8)(D_9-D_7B_6+B_8)}{(D_8+D_6B_6+B_8)(D_{12}-D_{10}B_6+B_8)}\right| - \frac{1}{2}B_4\cdot\ln\left|\frac{(D_3+B_4)(D_7-B_4)}{(D_6+B_4)(D_{10}-B_4)}\right| + \frac{1}{6}B_4\times$$

$$\times\ln\left|\frac{(D_4-D_3B_4+B_5)(D_9+D_7B_4+B_5)}{(D_8-D_6B_4+B_5)(D_{12}+D_{10}B_4+B_5)}\right| + \frac{1}{3}B_6\cdot\ln\left|\frac{(D_3-B_6)(D_7+B_6)}{(D_6-B_6)(D_{10}+B_6)}\right| + \frac{1}{\sqrt{3}}B_6\times$$

$$\times\left[\operatorname{arctg}\left(\frac{2D_7-B_6}{\sqrt{3}B_6}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{2D_{10}-B_6}{\sqrt{3}B_6}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{2D_3+B_6}{\sqrt{3}B_6}\right) + \operatorname{arctg}\left(\frac{2D_6+B_6}{\sqrt{3}B_6}\right)\right] +$$

$$+\frac{1}{\sqrt{3}}B_4\left[\operatorname{arctg}\left(\frac{2D_7+B_4}{\sqrt{3}B_4}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{2D_{10}+B_4}{\sqrt{3}B_4}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{2D_3-B_4}{\sqrt{3}B_4}\right) + \operatorname{arctg}\left(\frac{2D_6-B_4}{\sqrt{3}B_4}\right)\right] - \frac{1}{3}\ln|B|,$$

здесь

$$D_3 = \sqrt[3]{A_6 + \sqrt{A_5^3 + A_6^2}};\quad D_7 = \sqrt[3]{\sqrt{A_5^3 + A_6^2} - A_6};$$

$$D_6 = \sqrt[3]{A_3 + \sqrt{A_5^3 + A_3^2}};\quad D_{10} = \sqrt[3]{\sqrt{A_5^3 + A_3^2} - A_3};$$

$$D_9 = D_7^2;\quad D_8 = D_6^2;\quad D_{12} = D_{10}^2;\quad D_4 = D_3^2;\quad B_8 = B_6^2;\quad B_5 = B_4^2;$$

$$B_4 = \sqrt[3]{\sqrt{A_5^3 + \left(\frac{A_4}{\delta T_п} - A_3\right)^2} + \left(\frac{A_4}{\delta T_п} - A_3\right)^2};$$

$$B_6 = \sqrt[3]{\sqrt{A_5^3 + \left(\frac{A_4}{\delta T_п} - A_3\right)^2} + \left(\frac{A_4}{\delta T_п} - A_3\right)^2};$$

$$\frac{dx_L}{d\tau} = \frac{1}{R}\frac{d\xi_L}{d\tau} = \frac{n}{(n+3)}\frac{a_ф y_3(x_L)}{(R/3)^2}\times$$

$$\times\left[\sqrt[3]{A_3 + A_4 y(x_L) + \sqrt{A_5^3 + (A_5 + A_4 y(x_L))^2}} + \sqrt[3]{A_3 + A_4 y(x_L) - \sqrt{A_5^3 + (A_5 + A_4 y(x_L))^2}} - 1\right]^{-1}\times$$

$$\times\left[(n_o+3)K_п B_1'''(1-x_L)^{n_o+2} + K_{тж}\frac{\Delta T_o}{\Delta T_{кр}}y_{11}(x_L) + \frac{K_{кр}c}{a}\frac{y_8(x_L)y_{11}(x_L) - y_{12}(x_L)}{y_8(x_L)^2}\right]^{-1};$$

$$\tau_L = \frac{(n+3)}{na_{\text{ф}}}\left(\frac{R}{3}\right)^2 \int_0^{x_L} \frac{1}{y_3(x_L)} \left\{\left[\sqrt[3]{A_3 + A_4 y(x_L) + \sqrt{A_5^3 + (A_5 + A_4 y(x_L))^2}} + \right.\right.$$

$$\left. + \sqrt[3]{A_3 + A_4 y(x_L) - \sqrt{A_5^3 + (A_5 + A_4 y(x_L))^2}} - 1\right] \times$$

$$\left.\times \left[(n_o+3)\, K_{\text{п}} B_1'''(1-x_L)^{n_o+2} + K_{\text{тж}} \frac{\Delta T_o}{\Delta T_{\text{кр}}} y_{11}(x_L) + \frac{K_{\text{кр}} c}{a} \frac{y_8(x_L) y_{11}(x_L) - y_{12}(x_L)}{y_8(x_L)^2}\right]\right\} dx_L;$$

$$\frac{dx_S}{d\tau} = \frac{1}{R}\frac{d\xi_s}{d\tau} = \frac{n}{n+3}\frac{a_{\text{ф}}}{\beta(R/3)^2}\left[\delta T_o\left[[(1-x_S)^{n_o} - \frac{3}{n_o+3}]\right] + 1\right] \times$$

$$\times \left[3K_{\text{кр}}^{\bullet}(1-x_s)^2 + K_{\rho c}\frac{\Delta T_o}{\Delta T_s} f_{11}(x_s) + K_{\text{тж}} f_5(x_s) + K_{\text{кр}} c \frac{f_3(x_s) f_5(x_s) - f_4(x_s) f_6(x_s)}{f_3(x_s)^2}\right]^{-1} \times$$

$$\times \left[\sqrt[3]{A_3 + A_4\varphi(x_s) + \sqrt{A_5^3 + (A_3 + A_4\varphi(x_s))^2}} + \sqrt[3]{A_3 + A_4\varphi(x_s) - \sqrt{A_5^3 + (A_3 + A_4\varphi(x_s))^2}} - 1\right]^{-1};$$

$$\tau_s = \frac{n+3}{na_{\text{ф}}}\beta(R/3)^2 \int_0^{x_s} \left[\left[\sqrt[3]{A_3 + A_4\varphi(x_s) + \sqrt{A_5^3 + (A_3 + A_4\varphi(x_s))^2}} + \right.\right.$$

$$\left.\left. + \sqrt[3]{A_3 + A_4\varphi(x_s) - \sqrt{A_5^3 + (A_3 + A_4\varphi(x_s))^2}} - 1\right] \Big/ y_3(x_s)\right] \times$$

$$\times \left[3K_{\text{кр}}^{\bullet}(1-x_s)^2 + K_{\rho c}\frac{\Delta T_o}{\Delta T_s} f_{11}(x_s) + K_{\text{тж}} f_5(x_s) + K_{\text{кр}} c \frac{f_3(x_s) f_5(x_s) - f_4(x_s) f_6(x_s)}{f_3(x_s)^2}\right]^{-1} dx_s;$$

$$\tau_{\text{охл}} = \frac{3(n+3)}{na_{\text{ф}}}\left(\frac{R}{3}\right)^2 K_{\rho c}\beta\left[D_3 - D_6 - D_7 + D_{10} - \frac{1}{6}B_6 \times\right.$$

$$\times \ln\left|\frac{(D_4 + D_3 B_6 + B_8)(D_9 - D_7 B_6 + B_8)}{(D_8 + D_6 B_6 + B_8)(D_{12} - D_{10} B_6 + B_8)}\right| - \frac{1}{3}B_4 \ln\left|\frac{(D_3 + B_4)(D_7 - B_4)}{(D_6 + B_4)(D_{10} - B_4)}\right| + \frac{1}{6}B_4 \times$$

$$\times \ln\left|\frac{(D_4 - D_3 B_4 + B_5)(D_9 + D_7 B_4 + B_5)}{(D_8 - D_6 B_4 + B_5)(D_{12} + D_{10} B_4 + B_5)}\right| + \frac{1}{3}B_6 \ln\left|\frac{(D_3 - B_6)(D_7 + B_6)}{(D_6 - B_6)(D_{10} + B_6)}\right| + \frac{1}{\sqrt{3}} \times$$

$$\times B_6\left[\operatorname{arctg}\left(\frac{2D_7 - B_6}{\sqrt{3}B_6}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{2D_{10} - B_6}{\sqrt{3}B_6}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{2D_3 + B_6}{\sqrt{3}B_6}\right) + \operatorname{arctg}\left(\frac{2D_6 + B_6}{\sqrt{3}B_6}\right)\right] +$$

$$+ \frac{1}{\sqrt{3}}B_4\left[\operatorname{arctg}\left(\frac{2D_7 + B_4}{\sqrt{3}B_4}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{2D_{10} + B_4}{\sqrt{3}B_4}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{2D_3 - B_4}{\sqrt{3}B_4}\right) +\right.$$

$$\left.\left. + \operatorname{arctg}\left(\frac{2D_6 - B_4}{\sqrt{3}B_4}\right)\right] - \frac{1}{3}\ln\frac{\theta_o}{\theta}\right],$$

здесь

$$D_3 = \sqrt[3]{A_3 + A_4(K_{\text{нф}} - K_{\rho c}\theta)\beta/\theta + \sqrt{A_5^3 + \left[A_3 + A_4(K_{\text{нф}} - K_{\rho c}\theta)\beta/\theta\right]^2}};$$

$$D_6 = \sqrt[3]{A_3 + A_4(K_{\text{нф}} - K_{\rho c}\theta_o)\beta/\theta_o + \sqrt{A_5^3 + \left[A_3 + A_4(K_{\text{нф}} - K_{\rho c}\theta_o)\beta/\theta_o\right]^2}};$$

$$D_7 = \sqrt[3]{-\left(A_3 + A_4\left(K_{\text{нф}} - K_{\rho c}\theta\right)\beta/\theta\right) + \sqrt{A_5^3 + \left[A_3 + A_4(K_{\text{нф}} - K_{\rho c}\theta)\beta/\theta\right]^2}};$$

$$D_{10} = \sqrt[3]{-\left(A_3 + A_4\left(K_{\text{нф}} - K_{\rho c}\theta_o\right)\beta/\theta_o\right) + \sqrt{A_5^3 + \left[A_3 + A_4\left(K_{\text{нф}} - K_{\rho c}\theta_o\right)\beta/\theta_o\right]^2}};$$

$$B_4 = \sqrt[3]{\sqrt{A_5^3 + \left(A_4 K_{\rho c}\beta - A_3\right)^2} + \left(A_4 K_{\rho c}\beta - A_3\right)};$$

$$B_6 = \sqrt[3]{\sqrt{A_5^3 + \left(A_4 K_{\rho c}\beta - A_3\right)^2} - \left(A_4 K_{\rho c}\beta - A_3\right)};$$

$$D_9 = D_7^2;\ \ D_8 = D_6^2;\ \ D_{12} = D_{10}^2;\ \ D_4 = D_3^2;\ \ B_8 = B_6^2;\ \ B_5 = B_4^2;$$

$$\tau_{\text{ф.пр}} = \frac{(n+3)}{9na_{\text{ф}}} = \beta R^2 \int_0^{\xi_{\text{ф.пр}}} \Bigg[\sqrt[3]{A_3 + A_4 f\left(x_{\text{ф.пр}}\right) + \sqrt{A_5^3 + (A_3 + A_4 f(x_{\text{ф.пр}})^2}} +$$

$$+\sqrt[3]{A_3 + A_4 f\left(x_{\text{ф.пр}}\right) - \sqrt{A_5^3 + (A_3 + A_4 f(x_{\text{ф.пр}})^2}}\Bigg]\Big[(n_{\text{о}}+3)\,K_{\rho c}\,B_5\left(1 - x_{\text{ф.пр}}\right)^{n_o+2} +$$

$$+3K_{\text{ф.пр}}\left(1 - 2\,x_{\text{ф.пр}} + x_{\text{ф.пр}}^2\right) + K_{\rho c}B_3\left(n_{\text{о}}+1\right)\left[f_3(x_{\text{ф.пр}})\,f_2(x_{\text{ф.пр}}) + f_1(x_{\text{ф.пр}})f_4(x_{\text{ф.пр}})\right]\Big]\times$$

$$\times\left[\delta T_o(1 - x_{\text{ф.пр}})n_o + (\theta_{\text{ф.пр}} - 3\,\delta T_o/(n_o + 3)\right]^{-1} d\xi_{\text{ф.пр}},$$

где n – показатель распределения температуры по толщине прогретого слоя формы; $n_{\text{о}}$ – показатель распределения температуры по толщине отливки; $a_{\text{ф}}$ – температуропроводность прогретого слоя формы; $\delta T_{\text{п}}$ – приведенная относительная температура перегрева залитого в форму жидкого металла; $\delta T_{\text{кр}}$ – приведенная относительная температура интервала кристаллизации; $\theta_{\text{п}}$ – относительная температура жидкого металла в процессе отвода теплоты перегрева; $\delta T_{\text{о}}$ – приведенный относительный перепад температуры по толщине отливки; $T_{\text{о}}$ – среднеинтегральная температура по толщине отливки в процессах отвода теплоты перегрева, затвердевания и охлаждения; β – коэффициент, характеризующий перепад температуры между отливкой и внутренней поверхностью формы, $\beta \geq 1$; T_S – температура солидуса; $\Delta T_{\text{кр}} = (T_L - T_S)$ – температурный интервал кристаллизации; $\rho_{\text{ж}}$, $\rho_{\text{тж}}$, $\rho_{\text{т}}$, $\rho_{\text{о}}$ – плотность жидкого, твердожидкого, затвердевшего и охлаждающегося металла; $c_{\text{ж}}$, $c_{\text{тж}}$, $c_{\text{т}}$, $c_{\text{о}}$ – удельная теплоемкость жидкого, твердожидкого, затвердевшего и охлаждающегося металла; $\rho_{\text{ф}}$ – плотность формы; $c_{\text{ф}}$ – средняя удельная теплоемкость прогретого слоя формы в интервале температур ($T_{\text{нф}}...T_{\text{пф}}$); $T_{\text{нф}}$ – температура стенок формы перед заливкой ее жидким металлом; R – приведенный размер отливки; $T_{\text{пф}}$ – температура внутренней поверхности формы; $\Delta T_{\text{п}} = (T_{\text{з}} - T_L)$ – перегрев залитого в форму жидкого металла над температурой ликвидуса; $T_{\text{з}}$ – температуры залитого в форму жидкого металла над температурой ликвидуса T_L; L – удельная теплота кристаллизации; ψ – относительное количество твердой фазы в затвердевающем металле; $K_{\text{п}}$ – относительная объёмная теплота перегрева залитого в форму жидкого металла; $K_{\text{тж}}$ – относительная объёмная теплота твердожидкого металла; $K_{\text{кр}}$ – относительная объёмная теплота кристаллизации; $K_{\text{нф}}$ – относительная объемная плотность теплоты перегрева, кристаллизации и охлаждения; a, b, c – постоянные коэффициенты, численное значение которых зависит от процентного содержания углерода в стали, причем $c = a + b$; $x_L = \xi_L/R$ – относительная глубина фронта ликвидуса; ξ_L – глубина фронта ликвидуса; $x_S = = \xi_S/R$ – относительная глубина фронта солидуса; ξ_S – глубина фронта солидуса; $\theta_{\text{ф.пр}}$ – относительная температура фазового превращения; $K_{\text{ф.пр}}$ – относительная объемная теплота фазового превращения; $L_{\text{ф.пр}}$ – удельная теплота фазового превращения; $K_{\rho c}$ – относительная объемная теплота охлаждения отливки; $L_{\text{эф}}$ – эффективная удельная теплота кристаллизации; $x_{\text{ф.пр}} = \xi_{\text{ф.пр}}/R$ – относительная глубина фронта фазового превращения; $\xi_{\text{ф.пр}}$ – глубина фронта фазового превращения;

$$A_3 = \frac{(5n+6)}{4(n+3)};\ \ A_4 = K_n\beta\frac{3^2(n+1)(n+2)}{4(n+3)^2};\ \ A_5 = \frac{n}{2(n+3)};\ \ A_6 = A_3 + A_4\cdot\frac{1-\theta_{\text{п}}}{\theta_{\text{п}}\delta T_{\text{п}} + \delta T_{\text{кр}} + 1};$$

$$\theta_{\text{п}} = \frac{T_o - T_L}{\Delta T_{\text{п}}};\ \ K_{\text{п}} = \frac{\rho_{\text{ж}}c_{\text{ж}}\Delta T_{\text{п}}}{\rho_{\text{ф}}c_{\text{ф}}\left(T_S - T_{\text{нф}}\right)};\ \ \beta = \frac{T_o - T_{\text{нф}}}{T_{\text{пф}} - T_{\text{нф}}};$$

$$\delta T_{\text{п}} = \frac{\Delta T_{\text{п}}}{T_S - T_{\text{нф}}};\ \ \delta T_{\text{кр}} = \frac{\Delta T_{\text{кр}}}{T_S - T_{\text{нф}}};\ \ \delta T_{\text{о}} = \frac{\Delta T_{\text{о}}}{T_S - T_{\text{нф}}};$$

$$y_3(x_L) = [G_1 y_1(x_L) + G_2]/\beta;\ \ y_9(x_L) = y_2(x_L)y_6(x_L);\ \ y_{11}(x_L) = y_6(x_L)y_5(x_L) + y_4(x_L)y_7(x_L);$$

$$y(x_L)=\frac{K_n\left[\left(1-B_1'''y_1(x_L)\right)(1-x_L)^3+K_{\xi L}\right]+K_{тж}\dfrac{\Delta T_o}{\Delta T_{кр}}y_4(x_L)y_5(x_L)+\dfrac{K_{кр}c}{a}\dfrac{y_4(x_L)y_5(x_L)}{y_4(x_L)y_5(x_L)+B_6}}{y_3(x_L)};$$

$$y_1(x_L)=(1-x_L)^{n_o};\quad y_4(x_L)=\frac{1-y_1(x_L)}{1-x_L+\frac{1}{3}x_L^2};\quad G_1=\frac{\Delta T_o}{T_s-T_{нф}};\quad B'''=\frac{\Delta T_o}{\Delta T_п}\frac{n_o}{(n_o+3)};$$

$$B_6=\frac{b}{a}\frac{\Delta T_{кр}}{\Delta T_o};\quad y_2(x_L)=\frac{(1-x_L)^2}{n_o+1}\left(+\frac{2x_L(1-x_L)}{n_o+2}+\frac{x_L^2}{(n_o+3)}\right);\quad K_{\xi L}=3x_L\left(1-x_L+\frac{1}{3}x_L^2\right);$$

$$G_2=1+\delta T_{кр}-G_1\frac{3}{n_o+3};\quad y_5(x_L)=\left(\frac{(1-x_L)^2}{n_o+1}+\frac{2x_L(1-x_L)}{n_o+2}+\frac{x_L^2}{(n_o+3)}\right)\cdot K_{\xi L};$$

$$y_6(x_L)=\frac{n_o(1-x_L)^{n_o-1}\left(1-x_L+\frac{1}{3}x_L^2\right)+\left(1-\frac{2}{3}x_L\right)\left[1-(1-x_L)^{n_o}\right]}{\left(1-x_L+\frac{1}{3}x_L^2\right)^2};$$

$$y_7(x_L)=3\cdot\left[\frac{(1-x_L)^2}{n_o+1}+\frac{2x_L(1-x_L)}{n_o+2}+\frac{x_L^2}{n_o+3}\right](1-x_L)^2+\left[\frac{2x_L}{n_o+3}-\frac{2(1-x_L)}{n_o+1}+\frac{2(1-2x_L)}{(n_o+2)}\right]K_{\xi L};$$

$$y_8(x_L)=y_4(x_L)\cdot y_2(x_L)+\frac{b}{a}\frac{\Delta T_{кр}}{\Delta T_o};\quad y_{10}(x_L)=2y_4(x_L)\left(\frac{x_L}{n_o+3}-\frac{(1-x_L)}{n_o+1}+\frac{(1-2x_L)}{(n_o+2)}\right);$$

$$y_{12}(x_L)=y_4(x_L)\,y_5(x_L)[M_9(x_L)-y_{10}(x_L)];\quad \psi=\frac{c}{a}\frac{y_4(x_L)y_5(x_L)}{y_4(x_L)y_5(x_L)+B_6};$$

$$\varphi(x_s)=\frac{K_n+K_{кр}K_{\xi_s}+[K_{кр}c/f_3(x_s)+K_{тж}]f_4(x_s)+K_{\rho c}\dfrac{\Delta T_o}{\Delta T_s}f_1(x_s)f_2(x_s)}{y_3(x_s)};$$

$$y_1(x_s)=(1-x_s)^{n_o};\quad f_1(x_s)=\frac{1-y_1(x_s)}{1-x_s+\frac{1}{3}x_s^2};\quad f_3(x_s)=a\left[1-B_2'''(1-x_s)^{n_o}\right]+b;$$

$$f_2(x_s)=\left(\frac{(1-x_s)^2}{n_o+1}-\frac{2(1-x_s)x_s}{n_o+2}+\frac{x_s^2}{n_o+3}\right)K_{\xi s};\quad K_{\xi s}=3x_s\left(1-x_s+\frac{1}{3}x_s^2\right);$$

$$f_4(x_s)=\left[1-B_2'''(1-x_s)^{n_o}\right](1-x_s)^3;\quad y_3(x_s)=\left[\delta T_o\left[(1-x_s)^{n_o}-\frac{3}{n_o+3}\right]+1\right]\Big/\beta;$$

$$B_3=\frac{\Delta T_o}{\Delta T_s}\frac{1}{(n_o+1)};\quad K_{тж}=\frac{\rho_{тж}c_{тж}\Delta T_{кр}}{\rho_ф c_ф(T_s-T_{нф})};\quad K_{кр}=\frac{\rho_т L}{\rho_ф c_ф(T_S-T_{нф})};\quad \theta_{ф.пр}=\frac{T_{ф.пр}-T_{нф}}{T_s-T_{нф}};$$

$$K_{кр}^*=K_{кр}+K_{тж};\quad K_{\rho c}=\rho_o c_o/[\rho_ф c_ф];\quad K_{нф}=(K_п+K_{кр}^*+K_{\rho c});\quad K_{ф.пр}=\rho_o L_{ф.пр}/[\rho_ф c_ф(T_S-T_{нф}].$$

Расчет процессов затвердевания и охлаждения стальных отливок типа шар по представленным формулам представляет чрезвычайно сложную задачу. Для облегчения расчетов разработаны компьютерные программы. **Тип ЭВМ**: IBM PC – совместимые. Язык: C + +. **Операционная среда**: Windows XP [4]. Сведения о программе можно получить по электронному адресу: e-meil: Jumagavrilov@yandex.ru.

Список литературы

1. Юрин Ю.М. Расчет процесса затвердевания стальных отливок в сухих формах// Литейное производство. – 2007. – № 7. – С. 8–10.

2. Юрин Ю.М. Расчет времени затвердевания стальных отливок во влажных формах // Литейное производство. – 2007. – № 9. С. 19–22.

3. Юрин Ю.М. Расчет времени охлаждения стальных отливок в сухих формах // Литейное производство. – 2009. – № 1. – С. 6–9.

4. Юрин Ю.М. Расчет процессов затвердевания и охлаждения стальных отливок в формах с использованием номограмм и программ: монография; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е.Алексеева. – Нижний Новгород, 2010. – 276 с.