



УДК 539.3:539.3/.6:62-762.444

**Т.Ф. БРИМ**

ВКГТУ, г. Усть-Каменогорск

**ОСЕСИММЕТРИЧНОЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ В РАСЧЕТНЫХ СЕЧЕНИЯХ  
РАДИАЛЬНОГО ЭЛАСТОМЕРНОГО КОЛЬЦЕВОГО УПЛОТНИТЕЛЯ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО СЕЧЕНИЯ**

Кольцевые уплотнители круглого и эллиптического сечений в виде прокладок и манжет из различных синтетических резин (эластомеров) находят широкое применение в современном машиностроении и других отраслях техники [1-3].

Данная статья посвящена принципиально новому механико-математическому моделированию напряжений и деформаций, возникающих в расчетных сечениях резинового уплотнителя эллиптического профиля.

Расчетная схема (рис. 1, а) представляет собой кольцо несимметричного сплюснутого овального сечения ( $a_{\text{вн}} \neq a_{\text{вн}}, 2b_{\text{вн}} > a_{\text{вн}} + a_{\text{вн}}$ ), имеющего по периметру два плавносопряженных полуэллипса, что, в сравнении с более скручиваемым и менее надежным при эксплуатации торообразным уплотнителем ( $a_{\text{вн}} = a_{\text{вн}} = b_{\text{вн}}$ ) [1], позволяет осуществлять за счет большего числа варьируемых параметров, уже на стадии проектирования, реализацию процесса регулирования (оптимизации) конструктивных параметров уплотнительного устройства.

В основе решения этой неклассической (конструкционной) контактной задачи термоупругости о сжатии эластомерного кольца двумя абсолютно жесткими цилиндрическими поверхностями поршня и цилиндра (рис. 1, б) положены предпосылки, гипотезы и уравнения уточнённой физико-математической модели [4].

Для понимания существа вопроса приводим только самые необходимые буквенные обозначения с краткими пояснениями (рис. 1):

1)  $P_{\text{вн}} = \text{const}$ ,  $P_{\text{вн}} = \text{const}$  – равномерно распределённые по окружностям радиусами  $R_{\text{вн}}$  и  $R_{\text{вн}}$  нагрузки, представляющие собой равнодействующие функций реактивных усилий  $q_{\text{вн}}(y)$  и  $q_{\text{вн}}(y)$ , имеющих максимумы  $q_{\text{мвн}}$ ,  $q_{\text{мвн}}$  и средние давления  $q_{\text{свн}}$ ,  $q_{\text{свн}}$ ;

2)  $c_{\text{вн}}$ ,  $c_{\text{вн}}$  – параметры, характеризующие линейные размеры (полушкирину) областей контакта;

3)  $u_{\text{овн}}$ ,  $u_{\text{овн}}$ ,  $u_{\text{овн}}$ ,  $w_{\text{овн}}$  – общие перемещения, соответственно точек  $O$ ,  $A$ ,  $C$  и  $B$ ;

4)  $a_{\text{вн}}^*$ ,  $a_{\text{вн}}^*$ ,  $b_{\text{вн}}^*$  – деформированные полуоси эллиптического сечения кольца;

5)  $u_{\text{мвн}}$ ,  $u_{\text{мвн}}$ ,  $w_{\text{мвн}}$  – местные (контактные) абсолютные деформации;

6)  $\mu$ ,  $E_y$ ,  $J_\theta$  – соответственно коэффициент Пуассона, условный модуль упругости [5] и температурный функционал [6].

Общие формулы статических граничных условий для двумерных (плоских) задач теории упругости (рис. 2) [7,8]:

$$\sigma_x \cos \alpha + \tau_{xy} \sin \alpha = X_v = X_v(x, y), \quad (1)$$

$$\tau_{yx} \cos \alpha + \sigma_y \sin \alpha = Y_v = Y_v(x; y), \quad (2)$$

где  $X_v$ ,  $Y_v$  - проекции внешней распределённой нагрузки в заданной точке поверхности тела с нормалью  $v$ ;

$\alpha$  - угол наклона между положительным направлением оси  $x$  и прямой  $v$ .

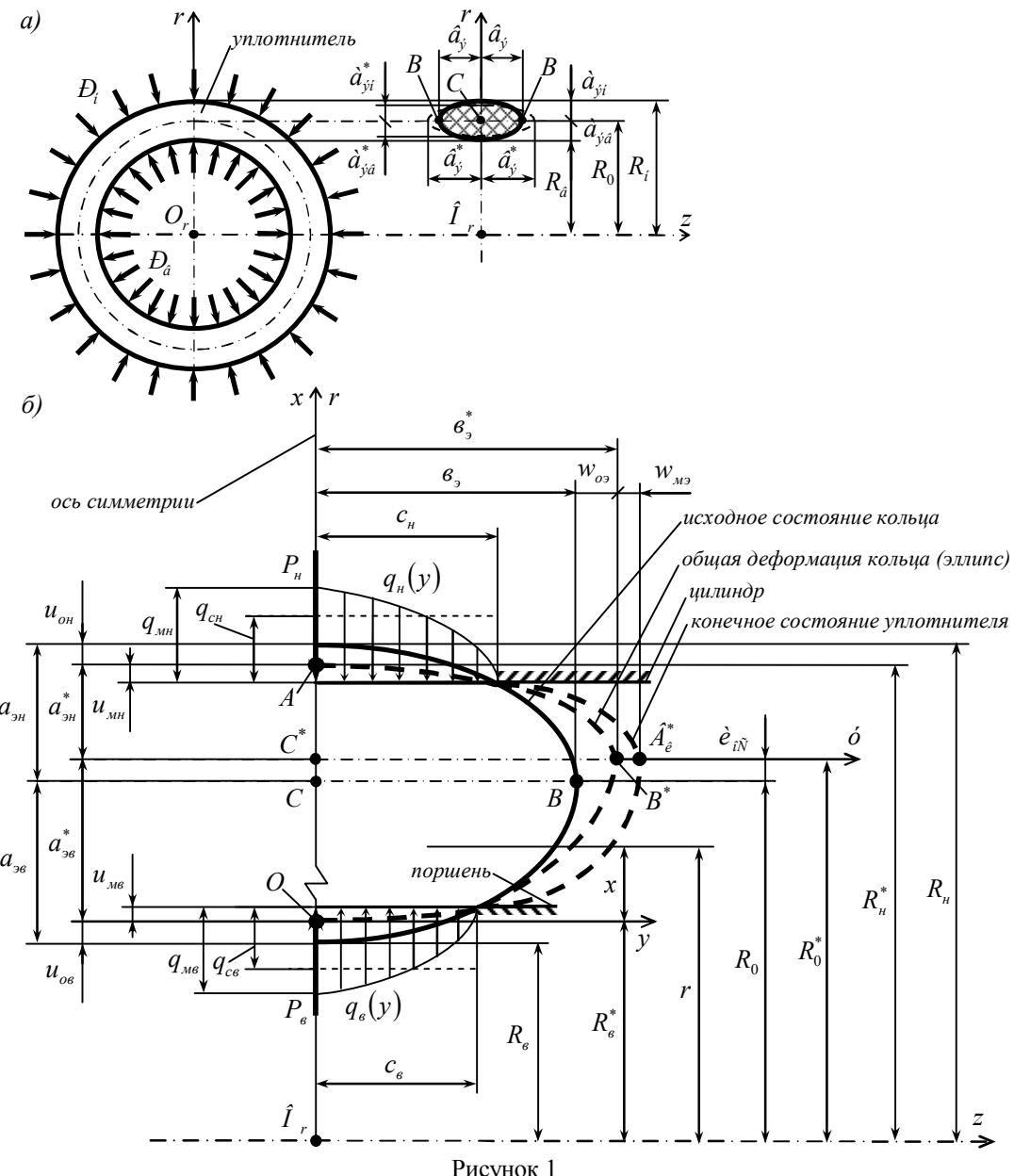


Рисунок 1

В статье предполагается рассматривать только два характерных сечения уплотнительного элемента с осью симметрии  $x$ , включающих четыре точки на его деформированной поверхности:  $O(0;0)$ ,  $A(a_{\vartheta\theta}^* + a_{\vartheta\eta}^*; 0)$ ,  $B^*(0; \pm b_{\vartheta}^*)$  (рис. 3). Согласно принятым обозначени-

ям для напряжений, уравнения (1)-(2) преобразуются следующим образом:

- точка  $O(0;0)$  ( $X_v = -q_{\text{мв}}, Y_v = 0, \alpha = 180^\circ$ ):

$$\sigma_{x\text{l}} \cos 180^\circ = -X_v = q_{\text{мв}},$$

$$\tau_{yx\text{l}} \cos 180^\circ = 0;$$

откуда

$$\sigma_{x\text{l}}(0;0) = -q_{\text{мв}}, \quad (3)$$

$$\tau_{yx\text{l}}(0;0) = 0; \quad (4)$$

- точка  $A(a_{\text{вб}}^* + a_{\text{вн}}^*; 0)$  ( $X_v = -q_{\text{мн}}, Y_v = 0, \alpha = 0$ ):

$$\sigma_{x\text{l}}(a_{\text{вб}}^* + a_{\text{вн}}^*; 0) = X_v = -q_{\text{мн}}, \quad (5)$$

$$\tau_{yx\text{l}}(a_{\text{вб}}^* + a_{\text{вн}}^*; 0) = 0; \quad (6)$$

- точка  $B^*(0; b_{\text{в}}^*)$  - правая ( $X_v = 0, Y_v = 0, \alpha = 90^\circ$ ):

$$\sigma_{y\text{l}}(0; b_{\text{в}}^*) = 0, \quad (5\text{a})$$

$$\tau_{xy\text{l}}(0; b_{\text{в}}^*) = 0. \quad (6\text{a})$$

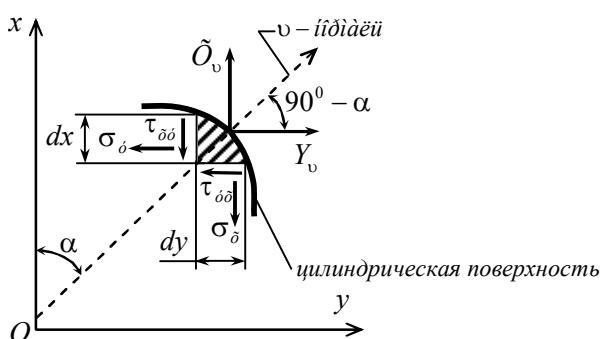


Рисунок 2

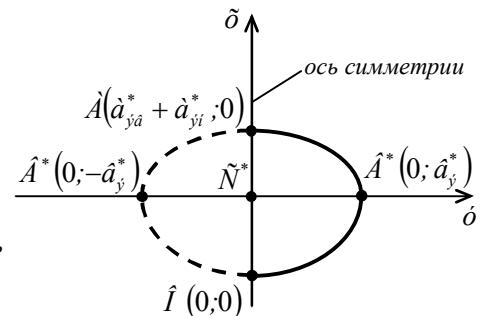


Рисунок 3

Наиболее напряженным расчетным сечением кольца (рис. 4) является вертикальная плоскость  $y = 0$  [7] - в системе отсчета  $xOy$ , где определяем функции внутренних усилий  $\sigma_{x\text{l}}(x;0)$ ,  $\sigma_{y\text{l}}(x;0)$  ( $0 \leq x \leq a_{\text{вб}}^* + a_{\text{вн}}^*$ ) для отсечённой по оси симметрии  $x$  половины кольца при касательных напряжениях  $\tau_{xy\text{l}}(x;0) = \tau_{yx\text{l}}(x;0) = 0$  [8,9].

Адаптируем формулы [10] для определения нормальных напряжений в рассматриваемом сечении:

$$\sigma_{x\text{l}}(x;0) = - \left[ \frac{A_1 C_e}{\sqrt{C_e^2 + x^2}} + \frac{A_2 C_h}{\sqrt{C_h^2 + [(a_{\text{вб}}^* + a_{\text{вн}}^*)^2 - x]^2}} \right], \quad (7)$$

$$\sigma_{yl}(x;0) = -2 \left\{ \frac{A_1}{c_e} \left( \frac{x^2 + 0,5c_e^2}{\sqrt{c_e^2 + x^2}} - x \right) + \frac{A_2}{c_h} \left[ \frac{\left[ (a_{\vartheta e}^* + a_{\vartheta h}^*)^2 - x \right]^2 + 0,5c_h^2}{\sqrt{c_h^2 + \left[ (a_{\vartheta e}^* + a_{\vartheta h}^*)^2 - x \right]^2}} - \left[ (a_{\vartheta e}^* + a_{\vartheta h}^*) - x \right] \right] \right\} + A_3, \quad (8)$$

где  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  – искомые постоянные коэффициенты ( $H/mm^2$ ).

Значения констант  $A_1$  и  $A_2$ , полученные в [10] из статических граничных условий (3), (5), запишем в следующем виде:

$$A_2 = \frac{\left( q_{mh} \sqrt{c_e^2 + (a_{\vartheta e}^* + a_{\vartheta h}^*)^2} - q_{me} c_e \right) \sqrt{c_h^2 + (a_{\vartheta e}^* + a_{\vartheta h}^*)^2}}{\sqrt{\left[ c_e^2 + (a_{\vartheta e}^* + a_{\vartheta h}^*)^2 \right] \left[ c_h^2 + (a_{\vartheta e}^* + a_{\vartheta h}^*)^2 \right]} - c_e c_h},$$

$$A_1 = q_{me} - \frac{A_2 c_h}{\sqrt{\left[ c_h^2 + (a_{\vartheta e}^* + a_{\vartheta h}^*)^2 \right]}}. \quad (9)$$

Постоянную  $A_3$  определим из специального граничного условия [4]

$$\int_{F_c^*} \sigma_{yl}(x;0) dF_c^* = 0, \quad x = r - R_e^*, \quad R_e^* \leq r \leq R_h^*, \quad (10)$$

где  $dF_c^* = rd\psi dr$  – бесконечно малый секториальный элемент кольца (рис. 4).

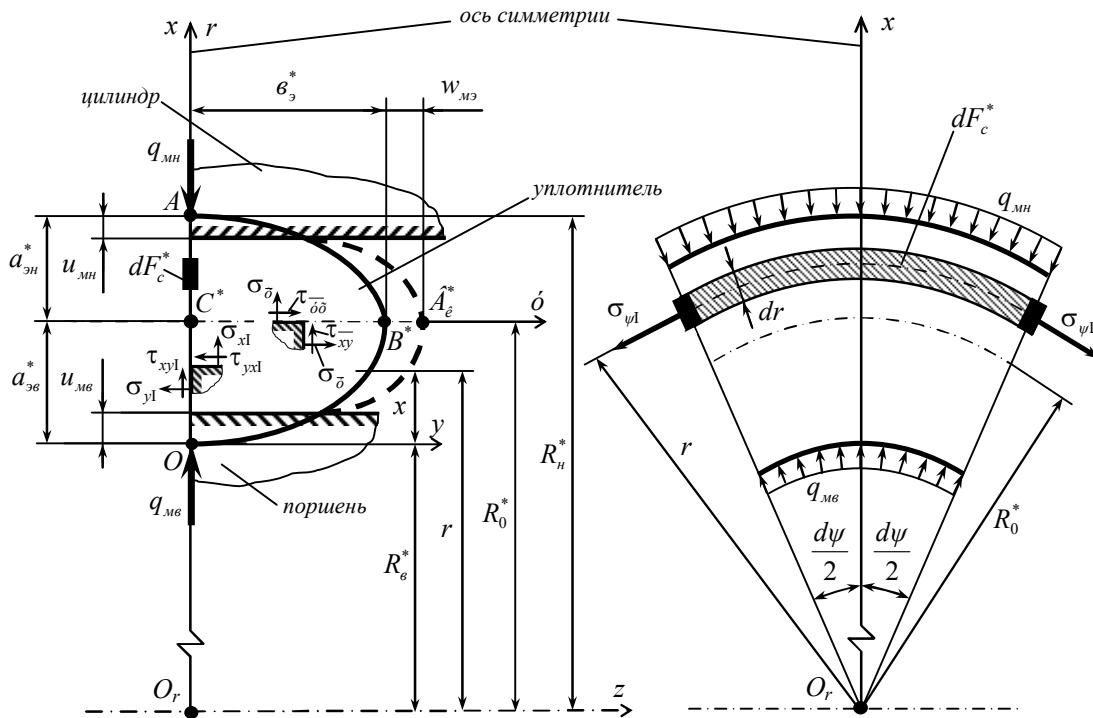


Рисунок 4

Вводим замену переменной  $r = x + R_e^*$ , согласно второму равенству (10), и получаем

$$dF_c^* = (x + R_e^*) d\psi dr. \quad (11)$$

Таким образом, граничное условие (10) с учетом (11) принимает вид:

$$\int_0^{a_{\text{ш}}^* + a_{\text{н}}^*} \sigma_{y1}(x; 0)(x + R_e^*) dx = 0. \quad (12)$$

Представив (12) в виде суммы

$$\int_0^{a_{\text{ш}}^* + a_{\text{н}}^*} \sigma_{y1}(x; 0)x dx + R_e^* \cdot \int_0^{a_{\text{ш}}^* + a_{\text{н}}^*} \sigma_{y1}(x; 0) dx = 0, \quad (13)$$

проинтегрируем с учетом (8) каждое слагаемое (13) по отдельности, используя [11].

В результате достаточно сложных замен, подстановок и преобразований получим:

$$\int_0^{a_{\text{ш}}^* + a_{\text{н}}^*} \sigma_{y1}(x; 0)x dx = \frac{A_1}{3c_e} \cdot I_1 + \frac{A_2}{3c_n} \cdot I_2 + A_3 \frac{(a_{\text{ш}}^* + a_{\text{н}}^*)^2}{2}, \quad (14)$$

$$R_e^* \int_0^{a_{\text{ш}}^* + a_{\text{н}}^*} \sigma_{y1}(x; 0) dx = \frac{A_1}{c_e} \cdot I_3 + \frac{A_2}{c_n} \cdot I_4 + R_e^* A_3 (a_{\text{ш}}^* + a_{\text{н}}^*), \quad (15)$$

где  $I_1, I_2, I_3, I_4$  – новые константы ( $mm^3$ ), равные

$$I_1 = -\sqrt{c_e^2 + (a_{\text{ш}}^* + a_{\text{н}}^*)^2} \cdot \left[ 2(a_{\text{ш}}^* + a_{\text{н}}^*)^2 - c_e^2 \right] - c_e^3 + 2(a_{\text{ш}}^* + a_{\text{н}}^*)^3, \quad (16)$$

$$I_2 = -\sqrt{c_n^2 + (a_{\text{ш}}^* + a_{\text{н}}^*)^2} \cdot \left[ (a_{\text{ш}}^* + a_{\text{н}}^*)^2 + c_n^2 \right] + c_n^3 + (a_{\text{ш}}^* + a_{\text{н}}^*)^3, \quad (17)$$

$$I_3 = R_e^* \left[ (a_{\text{ш}}^* + a_{\text{н}}^*)^2 - (a_{\text{ш}}^* + a_{\text{н}}^*) \sqrt{c_e^2 + (a_{\text{ш}}^* + a_{\text{н}}^*)^2} \right], \quad (18)$$

$$I_4 = R_e^* \left[ (a_{\text{ш}}^* + a_{\text{н}}^*)^2 - (a_{\text{ш}}^* + a_{\text{н}}^*) \sqrt{c_n^2 + (a_{\text{ш}}^* + a_{\text{н}}^*)^2} \right]. \quad (19)$$

Подставляя (14), (15) в (13), получим значение постоянной  $A_3$

$$A_3 = - \left[ \frac{A_1(I_1/3 + I_3)/c_e + A_2(I_2/3 + I_4)/c_n}{(a_{\text{ш}}^* + a_{\text{н}}^*)^2/2 + R_e^*(a_{\text{ш}}^* + a_{\text{н}}^*)} \right]. \quad (20)$$

Кольцевое напряжение  $\sigma_{y1}$  (рис. 4) определим по формуле, приведённой в [4]:

$$\sigma_{y1} = \mu(\sigma_{x1} + \sigma_{y1}) + E_y(s - J_\theta), \quad (21)$$

где  $s = \varepsilon_{y1}$  – функция относительной линейной деформации в кольцевом направлении, определяемая по формуле [8]

$$s = \varepsilon_{y1} = s_{1x}x + s_{2x}, \quad 0 \leq x \leq a_{\text{ш}}^* + a_{\text{н}}^*, \quad (22)$$

где  $s_{1x}$  ( $1/mm$ ),  $s_{2x}$  – неизвестные коэффициенты.

Для определения  $s_{1x}$ ,  $s_{2x}$  воспользуемся интегральной формулой для местных пере-

мещений, приведенной в [4]

$$u_{\text{м}} = u_{\text{м}}(x; 0) = \int \varepsilon_{\text{xI}} \partial x + C_u, \quad (23)$$

где  $C_u$  - постоянная интегрирования,

$\varepsilon_{\text{xI}}$  - линейный деформационный параметр по переменной  $x$ , согласно [4]

$$\varepsilon_{\text{xI}} = \frac{1}{E_y} \left[ (1 - \mu^2) \sigma_{\text{xI}} - \mu(1 + \mu) \sigma_{\text{yI}} - \mu E_y (s - J_\theta) \right] + J_\theta. \quad (24)$$

Подставив (24) с учетом (22) в (23), используя при интегрировании [11], получим

$$u_{\text{м}} = u_{\text{м}}(x; 0) = \frac{1 - \mu^2}{E_y} (B_1 - B_2) - \frac{\mu(1 + \mu)}{E_y} (B_3 + B_4 + B_5) + B_6 - \mu \frac{x^2}{2} s_{1x} + \mu x s_{2x} + C_u, \quad (25)$$

где  $B_1(H/\text{мм})$ ,  $B_2(H/\text{мм})$ ,  $B_3(H/\text{мм})$ ,  $B_4(H/\text{мм})$ ,  $B_5(\text{мм})$ ,  $B_6(\text{мм})$  - промежуточные переменные коэффициенты:

$$B_1 = B_1(x) = A_2 c_h \ln \left| \left[ (a_{\text{з6}}^* + a_{\text{зH}}^*) - x \right] / c_h + \sqrt{1 + \left\{ \left[ (a_{\text{з6}}^* + a_{\text{зH}}^*) - x \right] / c_h \right\}^2} \right|, \quad (26)$$

$$B_2 = B_2(x) = A_1 c_e \ln \left| x / c_e + \sqrt{1 + (x / c_e)^2} \right|, \quad B_3 = B_3(x) = A_1 \left( x^2 - x \sqrt{c_e^2 + x^2} \right) / c_e, \quad (27)$$

$$B_4 = B_4(x) = A_2 \left( \left[ (a_{\text{з6}}^* + a_{\text{зH}}^*) - x \right] \sqrt{c_h^2 + \left[ (a_{\text{з6}}^* + a_{\text{зH}}^*) - x \right]^2} + 2(a_{\text{з6}}^* + a_{\text{зH}}^*) x - x^2 \right) / c_h, \quad (28)$$

$$B_5 = B_5(x) = A_3 x, \quad B_6 = B_6(x) = x J_\theta (\mu + 1). \quad (29)$$

При  $x = 0$  (точка  $O$ , рис. 4), значение

$$u_{\text{м}} = u_{\text{м}}(0; 0) = u_{\text{мб}} \quad (30)$$

и постоянная  $C_u$  определится из формулы (25):

$$C_u = u_{\text{мб}} - \left\{ \frac{1 - \mu^2}{E_y} [B_1(0) - B_2(0)] - \frac{\mu(1 + \mu)}{E_y} [B_3(0) + B_4(0) + B_5(0)] + B_6(0) \right\}. \quad (31)$$

Из кинематического граничного условия в точке  $C^*(a_{\text{з6}}^*; 0)$  (рис. 4), как это обычно принимается в контактных задачах [12, 13], следует, что при  $x = a_{\text{з6}}^* = x_{C^*}$

$$u_{\text{м}}(a_{\text{з6}}^*; 0) = 0. \quad (32)$$

Аналогично (30), в случае  $x = a_{\text{з6}}^* + a_{\text{зH}}^* = x_h$ , имеем

$$u_{\text{м}}(a_{\text{з6}}^* + a_{\text{зH}}^*; 0) = u_{\text{мн}}. \quad (33)$$

На основании формул (25), (30), (32) и (33) запишем систему двух уравнений

$$\begin{cases} \varPi_{11} s_{1x} + \varPi_{12} s_{2x} = -B_{1\text{м}}, \\ \varPi_{21} s_{1x} + \varPi_{22} s_{2x} = -B_{2\text{м}}, \end{cases} \quad (34)$$

где  $\varPi_{11}(\text{мм}^2)$ ,  $\varPi_{12}(\text{мм})$ ,  $\varPi_{21}(\text{мм}^2)$ ,  $\varPi_{22}(\text{мм})$ ,  $B_{1\text{м}}(\text{мм})$  и  $B_{2\text{м}}(\text{мм})$  - коэффициенты при неизвестных  $s_{1x}$ ,  $s_{2x}$  и свободные члены:

$$\varPi_{11} = -\mu x_{C^*}^2 / 2, \quad \varPi_{12} = \mu x_{C^*}, \quad \varPi_{21} = -\mu x_h^2 / 2, \quad \varPi_{22} = \mu x_h; \quad (35)$$

$$B_{1\text{м}}(x_{C^*}) = \frac{1 - \mu^2}{E_y} [B_1(x_{C^*}) - B_2(x_{C^*})] - \frac{\mu(1 + \mu)}{E_y} [B_3(x_{C^*}) + B_4(x_{C^*}) + B_5(x_{C^*})] + B_6(x_{C^*}) + C_u, \quad (36)$$

$$B_{2,M}(x_n) = \frac{1-\mu^2}{E_y} [B_1(x_n) - B_2(x_n)] - \frac{\mu(1+\mu)}{E_y} [B_3(x_n) + B_4(x_n) + B_5(x_n)] + B_6(x_n) + C_u - u_{mn}. \quad (37)$$

Представим решение (33) в следующем виде [14]:

$$s_{1x} = D_{1,M}/D_M, \quad s_{2x} = D_{2,M}/D_M, \quad (38)$$

где  $D_{1,M}(mm^2)$ ,  $D_{2,M}(mm^3)$ ,  $D_M(mm^3)$  – определители (детерминанты) второго порядка;

$$D_{1,M} = -B_{1,M}\Lambda_{22} - (-B_{2,M})\Lambda_{12}, \quad D_{2,M} = \Lambda_{11}(-B_{2,M}) - \Lambda_{21}(-B_{1,M}), \quad D_M = \Lambda_{11}\Lambda_{22} - \Lambda_{21}\Lambda_{12}. \quad (39)$$

Вторым характерным сечением деформированного кольца, наряду с уже отмеченной плоскостью  $y=0$ , является поверхность цилиндра, имеющая радиальную координату  $r=R_0^*$  (или по модели плоской деформации  $x=a_{\vartheta}^*$ ) и включающая точки  $C^*(a_{\vartheta}^*; 0)$ ,  $B^*(a_{\vartheta}^*; \pm b_{\vartheta}^*)$  в параллельной системе координат  $yC^*x$  (рис. 4).

Для аппроксимации соответствующих напряжений  $\sigma_{\bar{x}} = \sigma_{\bar{x}}(a_{\vartheta}^*, y)$ ,  $\sigma_{\bar{y}} = \sigma_{\bar{y}}(a_{\vartheta}^*, y)$ ,  $\tau_{xy} = \tau_{yx} = \tau_{xy}(a_{\vartheta}^*, y)$  и принимая во внимание:

- симметрию расчетной схемы уплотнителя по отношению к оси  $x$  (рис. 1);
- физико-механические особенности рассматриваемой математической модели, касающиеся большой деформативности резины [4];
- классическую закономерность Лява [15,16] о характере распределения напряжений  $\sigma_{\bar{x}}$ ,  $\sigma_{\bar{y}}$  в бесконечно длинном круглом цилиндре, сжатом двумя диаметрально направленными силами (аналог данной задачи);
- экспериментально установленный факт растяжения материала кольца на его боковых поверхностях [2],

вводим специальную двумерную функцию Эри  $\varphi_M = \varphi_M(x; y)$ , чётную по аргументу  $y$ , представляя её следующей суммой [7-9,14,17]:

$$\varphi_M = \varphi_x \cos(\alpha_M y) + C_M \frac{x^2}{2} = \varphi_x \cos\left(\frac{\pi}{2b_{\vartheta}} y\right) + C_M \frac{x^2}{2}, \quad (40)$$

где  $\alpha_M = \frac{\pi}{2b_{\vartheta}} > 0$  – положительная константа;

$\varphi_x = \varphi_x(x)$  – искомая функциональная зависимость;

$C_M$  – пока неизвестный коэффициент.

Подставляя (40) в уравнение плоской задачи теории упругости

$$\nabla^4 \varphi_M = \frac{\partial^4 \varphi_M}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \varphi_M}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \varphi_M}{\partial y^4} = 0, \quad (41)$$

пренебрегая объёмными силами  $X$ ,  $Y$  (по принятому допущению [4])

$$X = Y = 0, \quad (42)$$

получаем

$$\left( \frac{d^4 \varphi_x}{dx^4} - 2\alpha_M^2 \frac{d^2 \varphi_x}{dx^2} + \alpha_M^4 \right) \cos(\alpha_M y) = 0. \quad (43)$$

Равенство (43) обращается в тождество при любых значениях  $y$ , если  $\varphi_x$  удовлетворяет обыкновенному дифференциальному уравнению

$$\frac{d^4\varphi_x}{dx^4} - 2\alpha_m^2 \frac{d^2\varphi_x}{dx^2} + \alpha_m^4 = 0, \quad (44)$$

решение которого выражается через гиперболические функции [13] и имеет вид [7-9]:

$$\varphi_x = C_{1,m}ch(\alpha_m x) + C_{2,m}sh(\alpha_m x) + C_{3,m}x ch(\alpha_m x) + C_{4,m}x sh(\alpha_m x), \quad (45)$$

где  $C_{1,m}, \dots, C_{4,m}$  – постоянные интегрирования.

Учитывая зависимости (40), (45), а также известные соотношения между  $\varphi_m$  и компонентами напряжений  $\sigma_{xm}, \sigma_{ym}, \tau_{y xm} = \tau_{yxm}$  [7-9], будем иметь при условии (42) (рис. 1) [7]:

$$\sigma_{xm} = \frac{\partial^2\varphi_m}{\partial y^2} = -\alpha_m^2 [C_{1,m}ch(\alpha_m x) + C_{2,m}sh(\alpha_m x) + C_{3,m}x ch(\alpha_m x) + C_{4,m}x sh(\alpha_m x)] \cos(\alpha_m y), \quad (46)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{ym} = \frac{\partial^2\varphi_m}{\partial x^2} = & \left\{ C_{1,m}\alpha_m^2 ch(\alpha_m x) + C_{2,m}\alpha_m^2 sh(\alpha_m x) + C_{3,m}\alpha_m [2sh(\alpha_m x) + \alpha_m x ch(\alpha_m x)] + \right. \\ & \left. + C_{4,m}\alpha_m [2ch(\alpha_m x) + \alpha_m x sh(\alpha_m x)] \right\} \cos(\alpha_m y) + C_m, \end{aligned} \quad (47)$$

$$\begin{aligned} \tau_{y xm} = \tau_{yxm} = -\frac{\partial^2\varphi_m}{\partial x \partial y} = & \alpha_m \{C_{1,m}\alpha_m sh(\alpha_m x) + C_{2,m}\alpha_m ch(\alpha_m x) + \\ & + C_{3,m}[ch(\alpha_m x) + \alpha_m x sh(\alpha_m x)] + C_{4,m}[sh(\alpha_m x) + \alpha_m x ch(\alpha_m x)]\} \sin(\alpha_m y). \end{aligned} \quad (48)$$

С целью повышения точности и адекватности общих формул (46)-(48) для расчётного сечения  $x = 0$  аппроксимируем их по конечному (деформированному) состоянию кольца при  $x = 0$ , включающему точку  $B_k^*$  (рис. 3):

$$\sigma_{\bar{x}} = \sigma_{\bar{x}}(y) = \sigma_{xm}(0; y) = -C_{1,m}\alpha_m^2 \cos(\alpha_m y); \quad (49)$$

$$\sigma_{\bar{y}} = \sigma_{\bar{y}}(y) = \sigma_{ym}(0; y) = \alpha_m(C_{1,m}\alpha_m + 2C_{4,m}) \cos(\alpha_m y) + C_m; \quad (50)$$

$$\tau_{\bar{y}x} = \tau_{\bar{x}y}(y) = \tau_{yxm}(0; y) = \alpha_m(C_{2,m}\alpha_m + C_{3,m}) \sin(\alpha_m y), \quad (51)$$

где переменная  $y$  изменяется в пределах замкнутого интервала

$$-\left(\beta_3^* + |w_{m3}|\right) \leq y \leq \beta_3^* + |w_{m3}|, \quad (52)$$

а  $w_{m3}$  – осевое перемещение точек  $B^*$  из начального положения  $B^*$  в конечное –  $B_k^*$  (рис. 4).

Константы  $C_m, C_{1,m}, \dots, C_{4,m}$  находим из четырёх статических граничных условий (рис. 5):

а) при  $y = 0$  – точка  $C^*$ :

$$\sigma_{\bar{x}}(0; 0) = \sigma_{x1}(a_{\bar{y}3}^*; 0), \quad (53)$$

$$\sigma_{\bar{y}}(0; 0) = \sigma_{y1}(a_{\bar{y}3}^*; 0); \quad (54)$$

б) при  $y = \pm(\beta_3^* + |w_{m3}|)$  – точки  $B_k^*$ :

$$\tau_{\bar{y}x}(0; \pm(\beta_3^* + |w_{m3}|)) = 0, \quad (55)$$

$$\sigma_{\bar{y}}(0; \pm(\beta_3^* + |w_{m3}|)) = 0. \quad (56)$$

Раскрывая равенства (53)-(56) с помощью функций (49)-(51), получим четыре алгебраических уравнения:

$$\begin{cases} -C_{1,M}\alpha_M^2 = \sigma_{xI}(a_{\vartheta_0}^*; 0), \\ -C_{1,M}\alpha_M^2 + 2C_{4,M}\alpha_M + C_M = \sigma_{yI}(a_{\vartheta_0}^*; 0), \\ C_{2,M}\alpha_M + C_{3,M} = 0, \\ (C_{1,M}\alpha_M^2 + 2C_{4,M}\alpha_M)\cos[\alpha_M(b_0^* + |w_{M0}|)] + C_M = 0. \end{cases} \quad (57)$$

Решение системы (57) имеет вид:

$$C_{1,M} = -\sigma_{xI}(a_{\vartheta_0}^*; 0)/\alpha_M^2, \quad (58)$$

$$C_M = \frac{\sigma_{yI}(a_{\vartheta_0}^*; 0)\cos[\alpha_M(b_0^* + |w_{M0}|)]}{\cos[\alpha_M(b_0^* + |w_{M0}|)] - 1}, \quad (59)$$

$$C_{4,M} = \frac{1}{2\alpha_M} \left\{ \sigma_{xI}(a_{\vartheta_0}^*; 0) - \frac{\sigma_{yI}(a_{\vartheta_0}^*; 0)}{\cos[\alpha_M(b_0^* + |w_{M0}|)] - 1} \right\}, \quad (60)$$

$$C_{2,M} = -\frac{C_{3,M}}{\alpha_M}. \quad (61)$$

По поводу постоянных  $C_{2,M}$  и  $C_{3,M}$  можно заметить, что найденное между ними соотношение (61) выполняется не только в граничных точках  $y = \pm(b_0^* + |w_{M0}|)$ , но и во всём диапазоне (52). Кроме того, согласно выражениям (49), (50), параметры  $C_{2,M}$  и  $C_{3,M}$  не влияют на напряжения  $\sigma_{\bar{x}}$ ,  $\sigma_{\bar{y}}$ . С учетом этих особых свойств зависимости (40) принимаем

$$C_{2,M} = C_{3,M} = 0. \quad (62)$$

В итоге получаем окончательные функции  $\sigma_{\bar{x}}$ ,  $\sigma_{\bar{y}}$  следующего вида:

$$\sigma_{\bar{x}} = \sigma_{xI}(a_{\vartheta_0}^*; 0)\cos\left(\frac{\pi}{2b_0}y\right), \quad (63)$$

$$\sigma_{\bar{y}} = \sigma_{yI}(a_{\vartheta_0}^*; 0)\frac{\left\{ \cos\left[\frac{\pi}{2b_0}(b_0^* + |w_{M0}|)\right] - \cos\left(\frac{\pi}{2b_0}y\right) \right\}}{\cos\left[\frac{\pi}{2b_0}(b_0^* + |w_{M0}|)\right] - 1} \quad (64)$$

при нулевых касательных напряжениях

$$\tau_{yx}^- = \tau_{xy}^-(y; 0) = 0 \quad (65)$$

по всему сечению  $x = 0$ .

Что касается четвёртой силовой компоненты  $\sigma_{\bar{\psi}}$ , то из условия непрерывности линейных относительных деформаций

$$\varepsilon_{\bar{\psi}}(0; 0) = \varepsilon_{\psi I}(a_{\vartheta_0}^*; 0) = s_{1x}a_{\vartheta_0}^* + s_{2x} \quad (66)$$

в точке  $C^*$  и физического уравнения [7, 9] будем иметь, по аналогии с  $\sigma_{\psi I}$  (формула (21)) и с учётом (63), (64):

$$\begin{aligned} \sigma_{\bar{\psi}} = \mu(\sigma_{\bar{x}} + \sigma_{\bar{y}}) + E_y(s_{1x}a_{\text{se}}^* + s_{2x} - J_0) &= \mu \left\{ \sigma_{xI}(a_{\text{se}}^*; 0) - \frac{\sigma_{yI}(a_{\text{se}}^*; 0)}{\cos\left[\frac{\pi}{2\epsilon_3}(\epsilon_3^* + |w_{M3}|)\right] - 1} \right\} \cos\left(\frac{\pi}{2\epsilon_3}y\right) + \\ &+ \mu\sigma_{yI}(a_{\text{se}}^*; 0) \frac{\cos\left[\frac{\pi}{2\epsilon_3}(\epsilon_3^* + |w_{M3}|)\right]}{\cos\left[\frac{\pi}{2\epsilon_3}(\epsilon_3^* + |w_{M3}|)\right] - 1} + E_y(s_{1x}a_{\text{se}}^* + s_{2x} - J_0). \end{aligned} \quad (67)$$

При этом (легко проверить) в точке  $\tilde{N}^*$  (рис. 5) соблюдается необходимое равенство

$$\sigma_{\bar{\psi}}(0; 0) = \sigma_{\psi I}(a_{\text{se}}^*; 0). \quad (68)$$

Решение поставленной многофункциональной контактной задачи термоупругости завершаем определением кинематической зависимости  $w_m = w_m(0; y)$  и её значений  $w_{M3} = w_{M3}(0; \pm(\epsilon_3^* + |w_{M3}|))$ , воспользовавшись соответствующими формулами Коши и обобщённого закона Гука (Дюгамеля-Неймана) для деформации  $\epsilon_{\bar{y}}$  [7-9]:

$$\epsilon_{\bar{y}} = \epsilon_{\bar{y}}(0; y) = \frac{\partial w_m}{\partial y} = \frac{1}{E_y} [\sigma_{\bar{y}} - \mu(\sigma_{\bar{x}} + \sigma_{\bar{\psi}})] + J_0, \quad (69)$$

откуда, после выполнения процедуры замены  $\sigma_{\bar{y}}$ ,  $\sigma_{\bar{x}}$  и  $\sigma_{\bar{\psi}}$  в соответствии с (63), (64) и (67), имеем

$$\begin{aligned} \epsilon_{\bar{y}} &= \frac{\partial w_m}{\partial y} = \frac{1}{E_y} [(1 - \mu^2) \sigma_{\bar{y}} - \mu(1 + \mu) \sigma_{\bar{x}} - \mu E_y(s_{1x}a_{\text{se}}^* + s_{2x} - J_0)] + J_0 = \\ &= \frac{1}{E_y} \left\{ (1 - \mu^2) \frac{\sigma_{yI}(a_{\text{se}}^*; 0) \left\{ \cos\left[\frac{\pi}{2\epsilon_3}(\epsilon_3^* + |w_{M3}|)\right] - \cos\left(\frac{\pi}{2\epsilon_3}y\right) \right\}}{\cos\left[\frac{\pi}{2\epsilon_3}(\epsilon_3^* + |w_{M3}|)\right] - 1} - \mu(1 + \mu) \sigma_{xI}(a_{\text{se}}^*; 0) \cos\left(\frac{\pi}{2\epsilon_3}y\right) \right\} - \\ &\quad - \mu(s_{1x}a_{\text{se}}^* + s_{2x} - J_0) + J_0. \end{aligned} \quad (70)$$

Интегрируя (70), находим

$$\begin{aligned} w_m &= w_m(0; y) = \frac{1}{E_y} \left\langle (1 - \mu^2) \sigma_{yI}(a_{\text{se}}^*; 0) \times \right. \\ &\quad \times \left. \left\{ y \cos\left[\frac{\pi}{2\epsilon_3}(\epsilon_3^* + |w_{M3}|)\right] - \frac{2\epsilon_3}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{2\epsilon_3}y\right) \right\} \right\rangle / \left\{ \cos\left[\frac{\pi}{2\epsilon_3}(\epsilon_3^* + |w_{M3}|)\right] - 1 \right\} - \\ &\quad - \mu(1 + \mu) \sigma_{xI}(a_{\text{se}}^*; 0) \frac{2\epsilon_3}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{2\epsilon_3}y\right) \rangle + y[(1 + \mu)J_0 - \mu(s_{1x}a_{\text{se}}^* + s_{2x})] + C_w, \end{aligned} \quad (71)$$

где постоянная

$$C_w = 0 \quad (72)$$

из условия кососимметричности функции  $w_m(0; y)$  по отношению к плоскости  $y = 0$  [4].

И, наконец, полагая  $w_{M2} > 0$  и  $y = \epsilon_3^* + w_{M2}$  в формуле (71) с учетом (72), получим трансцендентное уравнение для определения граничного перемещения  $w_{M2} > 0$  правой точки  $B^*$  (рис. 1), которое решается методом подбора:

$$w_{M2} = \frac{1}{E_y} \left\langle \left(1 - \mu^2\right) \sigma_{yI}(a_{36}^*; 0) \times \right. \\ \left. \times \left\{ \left(\epsilon_3^* + w_{M2}\right) \cos \left[ \frac{\pi}{2\epsilon_3} (\epsilon_3^* + w_{M2}) \right] - \frac{2\epsilon_3}{\pi} \sin \left[ \frac{\pi}{2\epsilon_3} (\epsilon_3^* + w_{M2}) \right] \right\} \right\rangle \left/ \left\{ \cos \left[ \frac{\pi}{2\epsilon_3} (\epsilon_3^* + w_{M2}) \right] - 1 \right\} - \right. \\ \left. - \mu(1 + \mu) \sigma_{xI}(a_{36}^*; 0) \frac{2\epsilon_3}{\pi} \sin \left[ \frac{\pi}{2\epsilon_3} (\epsilon_3^* + w_{M2}) \right] \right\rangle + (\epsilon_3^* + w_{M2}) [(1 + \mu) J_\theta - \mu(s_{1x} a_{36}^* + s_{2x})]. \quad (73)$$

В силу симметрии схемы рисунка 1 для точки  $B^*$ , расположенной слева, аналогичное значение  $w_{M2} < 0$ .

В точке  $C^*$  (рис. 5) соблюдаются условия непрерывности одноимённых напряжений  $\sigma_{\bar{x}} = \sigma_{xI}$ ,  $\sigma_{\bar{y}} = \sigma_{yI}$ ,  $\sigma_{\bar{\psi}} = \sigma_{\psiI}$ , так как при определении функции  $u_M(x; 0)$  принималось  $u_M(a_{36}^*; 0) = 0$  согласно (32), а вследствие условия симметрии расчетной схемы  $\tau_{yx}^- = \tau_{xyI} = 0$ .

Численная апробация выведенных формул напряжений (7), (8), (21) и (63), (64), (67), соответственно для вертикального и горизонтального сечений уплотнителя с построением эпюор  $\sigma_{xI}$ ,  $\sigma_{yI}$ ,  $\sigma_{\psiI}$ ,  $\sigma_{\bar{x}}$ ,  $\sigma_{\bar{y}}$ ,  $\sigma_{\bar{\psi}}$ , а также результат расчета  $w_{M2}$ , согласно (73), проиллюстрированы в конкретном примере на рисунке 5.

Относительные линейные деформации в вертикальном сечении  $\epsilon_{\psiI}$ ,  $\epsilon_{xI}$ ,  $\epsilon_{yI}$  при  $0 \leq x \leq a_{36}^* + a_{3n}^*$  определим, используя зависимости (22), (24) и формулу, приведённую в статье [4], с учетом выражения (22):

$$\epsilon_{yI} = \frac{1}{E_y} \left[ (1 - \mu^2) \sigma_{yI} - \mu(1 + \mu) \sigma_{xI} - \mu E_y (s - J_\theta) \right] + J_\theta. \quad (74)$$

Соответствующие графики функций  $\epsilon_{xI}(x; 0)$ ,  $\epsilon_{yI}(x; 0)$  и  $\epsilon_{\psiI}(x; 0)$  приведены на рис. 6. При этом физико-математическая корректность использованной в данной статье базовой математической модели [4] подтверждается проведёнными расчётом, на основании которых наибольшая по модулю линейная деформация  $|\epsilon_{\max}| = |\epsilon_{xI}(1,02; 0)| = 0,16 < 0,25$ .

Следует также отметить, что однозначный характер аппроксимирующей зависимости  $\sigma_{\bar{y}}$  с нулями в точках  $y = \pm(\epsilon_3^* + |w_{M2}|)$  был доказан не только в уже упомянутом фундаментальном решении Лява [15,16], но и в более поздних исследованиях напряженно-деформированного состояния радиальных эластомерных уплотнительных колец круглого сечения [18].

Выявленные и детально исследованные уточнённые функциональные зависимости всех характерных внутренних сил, деформаций и перемещений учитывают, в отличие от некорректной и неадекватной одноосной справочно-нормативной модели: 1) пространственный характер рассматриваемого изотермического процесса; 2) стационарное тепловое поле; 3) кривизну и (регламентируемое правилами технологии сборки) начальное относи-

тельное растяжение кольца; 4) деформированное состояние уплотнителя при определении силовых и геометрических характеристик; 5) фактическую сжимаемость резины, что особенно важно в случае отрицательных температур.

Полученные результаты могут быть непосредственно использованы в расчетах на прочность и жесткость радиальных кольцевых уплотнителей с овальным или круглым очертанием поперечного профиля, а также при подборе (оптимизации) их физико-механических и геометрических параметров в процессе математического моделирования и конструирования гидравлических, пневматических и вакуумных систем. В конечном итоге разработанная теория расчета позволяет количественно оценивать и регулировать при проектировании такие важнейшие эксплуатационно-технологические характеристики конструкции уплотнения, как функции контактных давлений; предварительные натяги; диаметры штока (поршня), цилиндра и канавки.

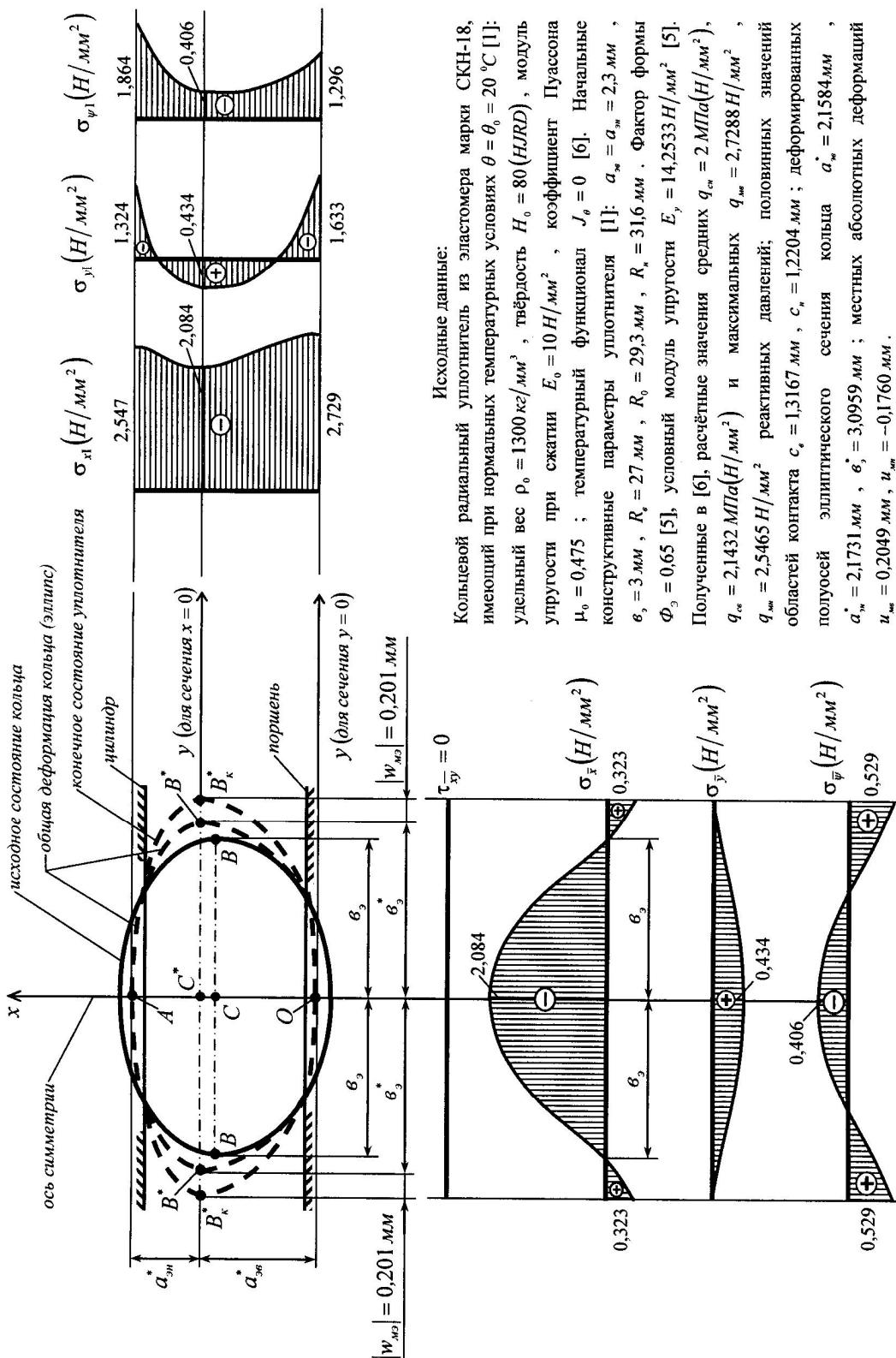


Рисунок 5

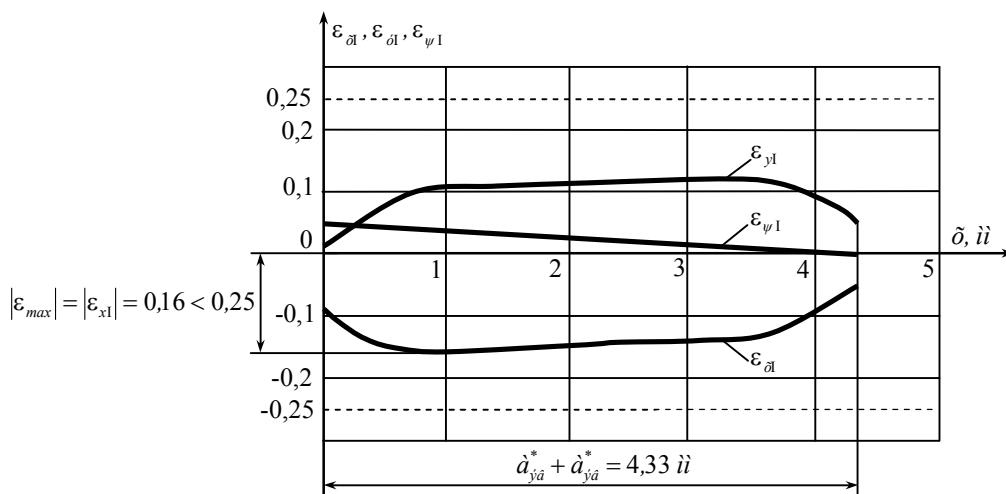


Рисунок 6

## Список литературы

1. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник /Л.А. Кондаков, А.И. Голубев, В.В. Гордеев и др.; Под общ. ред. А.И. Голубева, Л.А. Кондакова. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1994. - 448 с.
2. Кондаков Л.А. Уплотнения гидравлических систем. - М.: Машиностроение, 1972. - 240 с.
3. Аврущенко Б.Х. Резиновые уплотнители. - Л.: Химия, 1978. - 136 с.
4. Абдеев Б.М. Уточненная физико-математическая модель напряженно-деформированного состояния радиальных эластомерных уплотнительных колец эллиптического сечения для условий предварительного натяга / Б.М. Абдеев, Т.Ф. Бrim, Ж.О. Кульсейтов // Вестник ВКГТУ. - 2006. - № 4. - Усть-Каменогорск, 2006. - С. 30-43.
5. Абдеев Б.М. Условный модуль упругости и фактор формы резиновых уплотнительных колец несимметричного эллиптического сечения / Б.М. Абдеев, Т.Ф. Бrim, А.Ж. Кульсейтов // Вестник ВКГТУ. - 2007. - № 1. - Усть-Каменогорск, 2007. - С. 36-43.
6. Абдеев Б.М. К вопросу оценки прочности и жесткости радиальных эластомерных уплотнительных колец эллиптического сечения для условий предварительного натяга / Б.М. Абдеев, Т.Ф. Бrim, А.Ж. Кульсейтов // Вестник ВКГТУ. - 2007. - № 4. - Усть-Каменогорск, 2007. - С. 35-45.
7. Тимошенко С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудльер / Пер. с англ. М.И. Рейтмана. - М.: Наука, 1975. - 576 с.
8. Киселёв В.А. Плоская задача теории упругости: Учеб. пособие для вузов. - М.: Высшая школа, 1976. - 151 с.
9. Самуэль В.И. Основы теории упругости и пластичности. - М.: ВШ, 1970. - 288 с.
10. Абдеев Б.М. К вопросу определения напряжений в бесконечно длинной полосе, скжатой уравновешенными силами, распределенными по эллиптическому закону / Б.М. Абдеев, Т.Ф. Бrim, А.В. Вавилов // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Валихановские чтения - 12». - Кокшетау: РИО Кокшетауского гос. ун-та им. Ш.Ш. Уалиханова, 2007. - Т.4. - С. 3-6.
11. Смолянский М.Л. Таблицы неопределённых интегралов. - М.: Наука, Главная редакция физ.-мат. литературы, 1965. - 112 с.
12. Филин А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. - М.: Наука, 1975. - Т.1. - 832 с.
13. Штаерман И.Ф. Контактная задача теории упругости. - М., Л.: Гостехиздат, 1949. - 270 с.
14. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендаев. - М.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1962. - 608 с.
15. Тимошенко С.П. Прочность и колебания элементов конструкций. - М.: Наука, 1975. - 704 с.
16. Lowe A.E. Lehrbuch der Elastizität. Autorisierte Ausgabe unter Mitwirkung des Verfassers besorgt von Alois Timpe. Leipzig-Berlin, B.G. Teubner, 1907, 664 p.
17. Кошляков Н.С. Уравнения в частных производных математической физики / Н.С. Кошляков, Э.Б. Глиннер, М.Н. Смирнов. - М.: Высшая школа, 1970. - 712 с.
18. Абдеев Б.М. Контактная задача теории упругости о радиальном взаимодействии деформируемого тора с абсолютно жесткими цилиндрами / Б.М. Абдеев, Г.Е. Муслиманова // Вестник ВКГТУ. - 2001. - № 4. - Усть-Каменогорск, 2001. - С. 32-39.

Получено 13.10.2008

УДК 625.7.084

**М.В. Дудкин**

ВКГТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЯ СТЕПЕНИ УПЛОТНЕНИЯ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ  
МАТЕРИАЛОВ КАТКОМ С ВЕДУЩИМ ВАЛЬЦОМ ПЕРЕМЕННОГО РАДИУСА КРИВИЗНЫ**

Становление и развитие экономики любой страны тесно связано со строительством дорог. Нет особой нужды доказывать техническую и экономическую важность и потребность высококачественного уплотнения асфальтобетонных смесей при строительстве, реконструкции или ремонте покрытий автомобильных дорог. Применяемые сейчас передовые технологии и современные средства укладки и уплотнения горячих смесей позволяют дорожнику достаточно успешно и быстро справляться с этой сложной задачей в большинстве практических случаев, достигая высоких показателей ровности и плотности покрытия.

В результате процесса уплотнения повышается прочность слоев и уменьшается влагопоглощение уплотняемого материала. Нагрузка на уплотняемые дорожно-строительные материалы сводит до минимума их пористость и приближает к однородной структуре. Одновременно достигается более высокое качество поверхностного выравнивания.

Но при налаженных, традиционных схемах уплотнения дорожно-строительных материалов продолжается проектирование новой техники, так как только с созданием новых инновационных образцов дорожной техники связано дальнейшее развитие дорожного машиностроения.

Наряду с традиционными конструкциями дорожных катков в последнее время появились катки с уплотняющими вальцами принципиально нового конструктивного исполнения, обеспечивающие изменение давления в зоне контакта с опорной поверхностью за счет варьирования радиуса кривизны обечайки вальца [1, 2]. Это катки с гибкими уплотняющими вальцами, деформация круглой цилиндрической обечайки которых производится специальными роликами. Практическое внедрение таких катков связано с решением целого ряда не возникавших ранее технических проблем, а также созданием методики расчета этих передач.

Уплотняющий эффект статических катков достигается за счет нескольких факторов, основными из которых являются вес катка, количество и диаметр вальцов катка, рабочая скорость движения машины. Чем больше вес машины и меньше диаметр уплотняющих вальцов, тем выше уплотняющий эффект: плотность уплотняемого материала, глубина уплотнения.

Наибольшая эффективность процесса уплотнения грунтов и асфальтобетонных смесей достигается тогда, когда давления под рабочими органами катков поддерживаются близкими к пределу прочности уплотняемого материала. Это обуславливает необходимость регулирования силового воздействия катков на покрытие в зависимости от прочностных свойств последнего.

Контактные давления должны принимать такие рациональные значения, дальнейшее увеличение которых приводит к незначительному росту деформации уплотняемого слоя.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

При уменьшении максимальных контактных давлений под вальцом с большими значениями линейного давления и радиуса кривизны вальца увеличивается длина пятна контакта вальца с уплотняемым слоем, что приводит к увеличению времени действия уплотняющей нагрузки, а следовательно, и к увеличению вертикальной деформации слоя или его плотности. Прежде чем перейти к расчету показателя степени уплотнения, рассмотрим необходимые характеристики катка с ведущим вальцом переменного радиуса кривизны.

Рассматриваемый каток состоит из двух вальцов: ведомый передний, управляемый, с постоянным радиусом кривизны, и задний – ведущий. Общая масса катка дает нагрузку в 7000 кг, которая распределяется на управляемый ведомый валец  $P_y = 3000$  кг и на ведущий валец  $P_B = 4000$  кг.

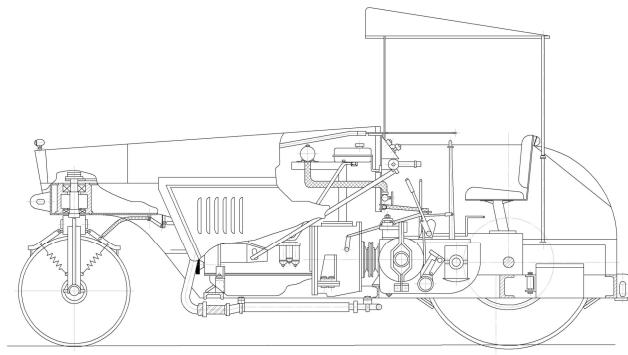


Рисунок 1 – Схема дорожного катка

Управляемый валец имеет диаметр  $D_y = 1000$  мм и ширину  $L_y = 1000$  мм, а ведущий валец – ширину  $L = 1250$  мм и переменный радиус кривизны (симметричное положение соответствует  $D_B=1200$  мм).

При указанном распределении нагрузки на вальцы характеристика переднего вальца будет постоянной для всех трех катков, работающих при укладке асфальтобетонной смеси и следующих за асфальтоукладчиком [3].

$$P_y = \frac{\rho_y}{L_y \cdot D_y} = \frac{3000}{100 \cdot 100} = 0,3 \text{ кг/см}^2.$$

В случае применения катка с изменяющимся радиусом кривизны вальца нагрузку от веса катка, действующую на уплотняемый материал, можно менять, изгибая обечайку вальца. Все параметры катка остаются прежними, кроме радиуса вальца в зоне контакта с уплотняемым материалом. Соответственно, с изменением радиуса вальца изменяется опорная площадка, вернее её площадь, через которую нагрузка передается на материал. При постоянной нагрузке увеличение площадки ведет к уменьшению статической нагрузки, передаваемой катком на материал, и, соответственно, при уменьшении радиуса при дальнейших проходах катка – к увеличению нагрузки.

Так как рациональные значения характеристики вальца, по данным мирового производства и опыту эксплуатации [4; 5; 6], колеблются в пределах  $q = (0,15 \div 0,45)$  кг/см<sup>2</sup> для катков статического действия, то для обеспечения вышеуказанного диапазона и, соответственно, различной степени уплотнения и нагрузки, передаваемой от вальца катка на уп-

лотняемый материал, находим обеспечивающие эту рациональную характеристику изменившие радиусы кривизны ведущих вальев всех трех катков, одновременно работающих в отряде с асфальтоукладчиком. Для этого разобъем указанный диапазон на три части со значениями:  $q_1=P_1=0,15$ ;  $q_2=P_2=0,3$ ;  $q_3=P_3=0,45 \text{ кг}/\text{см}^2$ .

$$\text{№1 } R_1 = \frac{D_1}{2} = \frac{\rho_e}{2P_1 \cdot L} = \frac{4000}{2 \cdot 0,15 \cdot 120} = 111,5 \text{ см},$$

$$\text{№2 } R_2 = \frac{D_2}{2} = \frac{\rho_B}{2P_2 \cdot L} = \frac{4000}{2 \cdot 0,3 \cdot 120} = 55,5 \text{ см},$$

$$\text{№3 } R_3 = \frac{D_3}{2} = \frac{\rho_B}{2P_3 \cdot L} = \frac{4000}{2 \cdot 0,45 \cdot 120} = 38 \text{ см.}$$

Каждая асфальтобетонная смесь (W. Nijboer) для своего оптимального уплотнения требует такое значение показателя  $P_f$ , которое уже не зависит от структуры уплотняемой смеси.

Показатель степени уплотнения представляет произведение работы на время, которое действует в определенном состоянии уплотняемой смеси.

Проведенными лабораторными исследованиями [3] установлена связь между показателем уплотнения  $P_f$  и коэффициентом уплотнения  $K_y$ , которая представлена графиком на рис. 2.

Оптимальное уплотнение асфальтобетонной смеси, при ее предварительном уплотнении асфальтоукладчиком, достигается при значении суммарного показателя степени уплотнения не ниже  $\Sigma R_j = 6 \cdot 10^5 \text{ кг}\cdot\text{см}\cdot\text{с}$  [7, 8].

Расчет суммарного показателя уплотнения представлен в таблице и равен  $\Sigma R_j = 7,012 \cdot 10^5$ .

Таким образом, уплотнение обеспечено, т.к.  $P_f = 7,012 \cdot 10^{-5} > 6 \cdot 10^{-5}$ .

Для  $P_f = 7,012 \cdot 10^{-5}$  согласно графику на рисунке 2  $K_y = 0,992$ .

Из выполненного расчета становится очевидным, что необходимое уплотнение заданного участка асфальтобетонного покрытия достигается тремя катками одинаковой конструкции за счет изменения радиуса кривизны на трех участках вместо применения трех катков разных конструкций и весовых характеристик.

#### Расчет показателя уплотнения

Каток	Валец	$\frac{P}{L \cdot D}$ $\text{кг}/\text{см}^2$	$2,5 \tau_{c6}$ $\text{кг}/\text{см}^2$	(1)-(2)	$\frac{(3)}{3,9 \cdot \eta_m} 10^{11}$	n	(4)·n	$\left(\frac{h}{V}\right)^{0,4}$	$P_f \cdot 10^{-5}$	$\Sigma R_j \cdot 10^5$
(1)	(2)	(3)	(4)							
№1	передний	0,3	0,0126	0,2874	0,408	2	0,816	1,48	1,2	1,781
	задний	0,15	0,0126	0,1374	0,196	2	0,392	1,48	0,582	
№2	передний	0,3	0,0262	0,2738	0,342	4	1,368	1,12	1,53	3,059
	задний	0,3	0,0262	0,2738	0,342	4	1,368	1,12	1,53	
№3	передний	0,3	0,166	0,134	0,122	6	0,732	0,955	0,7	2,67
	задний	0,45	0,166	0,284	0,256	6	1,546	0,955	1,47	

										7,510
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	-------

Уплотнение выполняется однотипными катками, поэтому все они могут быть взаимозаменяемыми на любом этапе уплотнения или поломки какого-либо катка. Повышается степень использования всех катков, так как каток, выполняющий предварительное легкое уплотнение после изменения радиуса вальца, может выполнять работу более тяжелого катка, а по мере остывания материала уплотнять его максимально возможной статической нагрузкой, передаваемой от веса катка [9].

Проведем оценку производительности катка с вальцом переменного радиуса кривизны в зоне контакта с рабочей поверхностью.

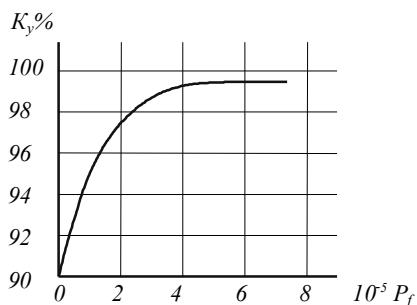


Рисунок 2 – Зависимость суммарного значения показателя уплотнения  $P_f$  от коэффициента уплотнения  $K_y$

При оценке оборудования для уплотнения покрытий дорог и других инженерных сооружений необходимо учитывать правильное сочетание усилия на единицу объема уплотняемого материала, производительность, равную отношению уплотняемого объема ко времени и энергии, требуемой для того, чтобы достичь заданной степени уплотнения.

Оптимально сочетание этих факторов должно лежать в основе проектирования любого уплотняющего оборудования и в оценке его работы. Параметрами для оценки производительности катка являются: весовая нагрузка на валец (с учетом его собственного веса)  $P$ , толщина уплотняемого слоя  $h$ , ширина уплотняемого слоя  $L$ , скорость движения катка  $V$  и коэффициент сопротивления перекатыванию  $f_c$  [10; 11; 12].

Рассмотрим основные зависимости, которые связывают усилие уплотнения, производительность и потребляемую энергию с основными параметрами, определяющими грунт (уплотняемое покрытие) и уплотняющее его оборудование.

Основные зависимости рассмотрим при качении гладкого вальца по уплотняемому покрытию (рис. 3), где  $P$  - весовая нагрузка на валец и  $F$  - потребная сила на его перекатывание. Если обозначить через  $f_c$  коэффициент сопротивления перекатыванию вальца при уплотнении покрытия, то сила сопротивления движению вальца

$$F = f_c \cdot P. \quad (1)$$

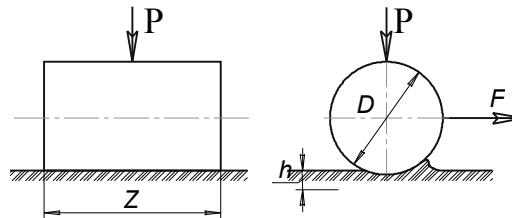


Рисунок 3 – Качение гладкого вальца по уплотняемому покрытию

Согласно опытным данным определены значения коэффициентов сопротивления перекатыванию для различных уплотняемых поверхностей, например таких, как жирная глина - 0,26; пылевидная глина - 0,29; гравий - 0,34; песок - 0,58.

Введем понятие работы уплотнения  $e = F \cdot B \cdot n$ , где  $B$  - длина прохода,  $n$  - число проходов. Учитывая (1), находим

$$e = f_c \cdot P \cdot B \cdot n. \quad (2)$$

При толщине уплотняемой полосы  $h$  (усредненное значение) уплотняемый объем можно выразить формулой

$$V = B \cdot L \cdot h. \quad (3)$$

Удельная работа уплотнения выражается как отношение работы уплотнения к уплотняемому объему:

$$E = \frac{e}{V_c} = \frac{f_c \cdot \rho \cdot n}{L \cdot h}. \quad (4)$$

Вводя выражение весовой нагрузки через характеристику уплотнения  $P = \frac{\rho}{L \cdot D}$ , находим

$$E = \frac{f_c \cdot P \cdot n \cdot D}{h}. \quad (5)$$

Ранее принятые пределы изменения характеристики уплотнения составили  $(0,15 \div 0,45)$  кг/см<sup>2</sup>. При использовании выражения (5) нужно выдерживать размерности всех величин. Зависимость (5) можно использовать для нахождения  $E_{max}$  при  $P_{max}$  и  $E_{min}$  при  $P_{min}$  и построить графики зависимостей  $E_{max}$  от  $n$  и  $E_{min}$  от  $n$  при известном коэффициенте сопротивления качению вальца  $f_c$  и разных значениях толщины укатываемого слоя ( $h_1, h_2, h_3, h_4$ ) (рис. 4 и 5).

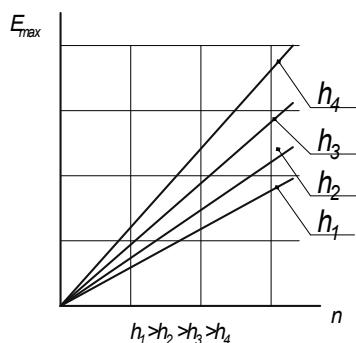


Рисунок 4 – Удельная работа уплотнения при  $P_{max}$  в зависимости от толщины слоя и числа проходов

дов

Величины  $h$  и  $f_c$  нужно выбирать из условий практики для разных уплотняемых материалов.

Производительность равна уплотняемому объему материала  $V_c$ , поделенному на время укатки, требуемое для прохождения катком расстояния  $n \cdot B$ . При заданной скорости  $V$  время  $t = \frac{n \cdot B}{V}$ .

Итак, производительность катка  $R$  ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ) равна

$$R = \frac{B \cdot L \cdot h \cdot V}{L \cdot n} = \frac{B \cdot h \cdot V}{n}. \quad (6)$$

Используя выражения (5) и (6), находим окончательно

$$R = \frac{f_c \cdot \rho \cdot V}{E} = \frac{f_c \cdot L \cdot P \cdot D \cdot V}{E}. \quad (7)$$

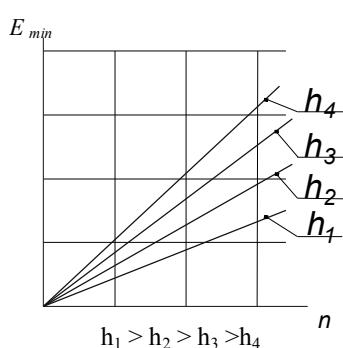


Рисунок 5 – Удельная работа уплотнения при  $P_{min}$  в зависимости от толщины слоя и числа проходов

Используя зависимость (6) при заданном значении скорости движения  $V$ , можно построить графики зависимости  $R$  от  $h$  при разном числе проходов  $n$  (рис. 6) вальца за время полного уплотнения. Строится серия графиков для разных значений скорости движения катка  $V$ .

Мощность, затрачиваемая на уплотнение:

$$W = E \cdot R = f_c \cdot P \cdot L \cdot D \cdot V \quad (8)$$

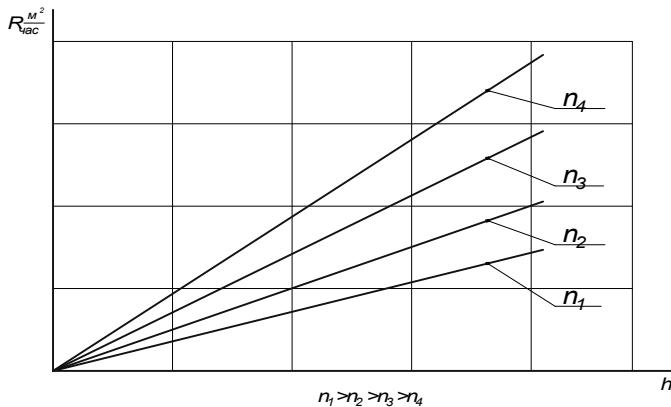


Рисунок 6 – График зависимости производительности катка  $R$  от толщины слоя  $h$  при различном числе  $n$  проходов катка

Материал этой статьи предполагается к использованию при проведении лабораторных испытаний опытного образца катка с ведущим вальцом переменного радиуса кривизны в зоне контакта с грунтом и для сравнения экспериментальных и теоретических исследований.

#### Список литературы

1. Головин А.А. Виброволновые дорожные катки: Конструкция. Теория и расчет. Опыт применения: Монография. - Тверь: ТГТУ, 2002. - 76 с.
2. Павлов В.В. Каток с ведущим вальцом переменной кривизны / В.В. Павлов, А.Б. Коняев // Строительные и дорожные машины. - 1995. - № 4. - С. 23-25.
3. Обоснование и исследование конструкции ведущего вальца самоходного катка с переменной кривизной в зоне уплотнения: Отчет о НИР/ Рук. темы Г.С. Маслов - Тема 250187. - М., 1988. - 89 с.
4. Дудкин М.В. Обоснование параметров и разработка вибрационных катков с асимметричным планетарным вибровозбудителем: Автoref. дис.... канд. техн. наук. - Астана: Евразийский национальный университет им. Л. Гумилева, 2002 - 21 с.
5. Дудкин М.В. Обоснование характеристики уплотнения дорожного покрытия и параметров вальца статического катка // Вестник ВКГТУ. - 2008. - № 1. - Усть-Каменогорск, 2008.
6. Захаренко А.В. Теоретические и экспериментальные исследования процессов уплотнения катками грунтов и асфальтобетонных смесей: Дис.... д-ра техн. наук: 05.05.04. - Омск: СибАДИ, 2005. - 320 с.
7. Drs. W. Nijboer. Plasticity is a factor in the design of dense bituminous earpers Elsevier Publishing Comp. Tnc. New-York - Amsterdam - London - Brussels. 1988.
8. Nijboer. Betrachtungen über die Berechnung von Straßenbelägen mit Desonderes Berück sichtigung des bit Untebaus. Straße und Verkehz, Heft, 11/1960, 29 - 41.
9. Калужский Я.А. Уплотнение земляного полотна и дорожных одежд / Я.А. Калужский, О.Т. Батраков. - М.: Транспорт, 1971. - 160 с.
10. Шестопалов К.К. Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование: Учеб. пособие. - М.: Мастерство, 2002. - 320 с.
11. Хархута Н.Я. Типы и параметры дорожных катков / Н.Я. Хархута, А.А. Шестопалов // Строительные и дорожные машины. - 1986. - № 1. - С. 14-16.
12. Шестопалов А.А. Эффективность применения гладковальцовых катков при уплотнении асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог / А.А. Шестопалов, Т.Н. Сергеева, П.И. Марков, В.С. Марышев. - Л.: ЛДНТП, 1984. - 32 с.

Получено 08.10.08

**С.Д. Капаева, Н.М. Комков, М.Р. Тусупбеков**  
ВКГТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА РЕЗАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ В СРЕДЕ  
ВОДОРАСТВОРIMОЙ ПОЛИМЕРНОЙ СОЖ ВП-4**

В обеспечении подъема экономики ведущую роль играет машиностроительная отрасль, и в частности обработка металлов резанием. При этом в развитии машиностроения большое внимание уделяется совершенствованию технологии механической обработки, повышению производительности и точности, увеличению износостойкости режущего инструмента. Ритм производства требует увеличения количества и номенклатуры режущего инструмента и, естественно, увеличения расхода легирующих компонентов для производства твердых сплавов. В данной ситуации особое значение приобретает увеличение срока службы уже имеющегося режущего инструмента, повышение его износостойкости. Решению этой проблемы может способствовать и выбор смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ).

В основном в настоящее время в машиностроении применяются масляные и эмульсионные СОЖ. Их применение отрицательно сказывается на условиях труда и техническом состоянии деталей металлорежущих станков. Кроме этого они сложны в изготовлении, пользовании и могут нанести ущерб окружающей среде.

Изучение технической литературы показало, что водорастворимые полимерные СОЖ не уступают (по влиянию на контактные процессы) масляным и эмульсионным СОЖ. Поэтому необходимо было получить такой состав водорастворимых полимерных СОЖ, который по своим охлаждающим способностям не уступает эмульсиям, а по смазочным способностям – масляным СОЖ.

Новая СОЖ должна сочетать в себе противоположные свойства: пониженное поверхностное натяжение, т.е. хорошую смачиваемость; проницаемость в трещины металла и повышенную вязкость для создания наибольшего давления в жидкости между двигающимися поверхностями.

В работах различных авторов исследование водорастворимых полимерных СОЖ рассматривалось на процессах фрезерования, шлифования, резьбонарезания, зубонарезки, но в точении значительно меньше, хотя этот вид занимает больший процент в общем объеме металлообработки современного машиностроения.

Данная работа посвящена повышению стойкости токарных резцов путем исследования влияния водорастворимой полимерной СОЖ на износостойкость токарных резцов, качество обработанной поверхности при точении конструкционных и легированных сталей.

Для экспериментального определения изотерм  $P(h)$  давления смачивающей полимерной пленки применяют различные методы. Первые исследования были выполнены Б.В. Дерягиным и М.М. Кусаковым [1] с помощью пузырьков газа различного радиуса  $R_0$ , которые, всплывая, приближались к горизонтально установленной плоской гладкой пластинке (рис. 1).

Расклинивающее давление плоской пленки определяется уравнением [1], в котором  $P = \left(\frac{2\sigma}{R_0}\right) + P_0$  отвечает давлению газа в пузырьке и  $P_0$  – давлению в объемной жидкой фазе, окружающей пузырек. Подставляя значения  $P$  и  $P_0$  в [1], получим:

$$\Pi = \left( \frac{2\sigma}{R_0} \right) = \Delta P_k . \quad (1)$$

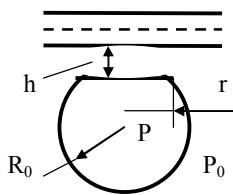


Рисунок 1 – Пузырьковый метод получения изотерм расклинивающего давления смачивающих пленок

Изотермы расклинивающего давления пленки в плоскости сдвига меняется в пределах  $8,95 \cdot 10^2 - 7,77 \cdot 10^5$  Па и толщина пленки в пределах  $400-25 \text{ \AA}^0$ .

В расчете разрушающего усилия определяем среднее нормальное давление жидкости между движущимися поверхностями [2]:

$$P = \mu \frac{\omega C_R}{\nu^2}, \quad (2)$$

где  $V$  – окружная скорость резания, м/мин;  $\omega$  – угловая скорость детали, рад/с;  $\mu$  – динамическая вязкость;

$\nu$  – кинематическая вязкость;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $C_R$  – коэффициент нагрузженности принимаем по [1].

Определяем давление жидкости  $P$  (Па) между контактирующими поверхностями детали и резца:

$$P = \mu \frac{\omega C_R}{\nu^2} = \mu \cdot 5,769 \cdot 10^7.$$

$$P = \mu \frac{720}{1,557 \cdot 10^{-10}}. \quad (3)$$

При достижении микротрешины величины более  $50 \text{ \AA}^0$  к расклинивающему давлению прибавляется давление в объеме жидкости и достигает:

$$7,77 \cdot 10^5 + 7,77 \cdot 10^5 + 1298025 = 2852025 \text{ Па},$$

$$( \text{ \AA}^0 = 10^{-8} \text{ см} = 10^{-10} \text{ м}).$$

В результате расклинивающего действия адсорбционной полимерной пленки и давления самой жидкости СОЖ ВП-4 процесс резания проходит с меньшей нагрузкой на режущий инструмент, что приводит к увеличению его стойкости в 1,2-1,5 раза, достижению шероховатости  $R_a=1,1$  мкм и размерной точности обработанных деталей при высокоскоростной обработке конструкционных и высоколегированных сталей.

Отсюда следует, что особенность протекания процесса резания зависит от механизма пластической деформации металла в различных средах.

Изучение контактных процессов в зоне резания объясняет природу образования таких явлений, как трение, стружкообразование, поверхностное упрочнение (наклеп), шероховатость обработанных поверхностей заготовок, износ металорежущего инструмента.

Изучая процесс стружкообразования, исследователи установили, что СОЖ уменьшает длину контакта стружки с резцом в основном за счет сокращения зоны упругого контакта. СОЖ будет оказывать свое воздействие через изменение среднего коэффициента трения, определяя угол действия. Использование СОЖ, проникающей в зону резания, позволяет уменьшить значение коэффициента трения, изменить напряженное состояние металла [3].

С этой целью был создан ряд новых составов водорастворимых полимерных СОЖ, исследование которых раскрыло механизм действия их при стружкообразовании и характер

пластической деформации обрабатываемого металла при точении.

Для исследования характера пластически деформированной зоны резания были изготовлены шлифы металлических образцов обработанных деталей в различных средах и проведен их металлографический анализ. Для сравнительного анализа использовалась стандартная жидкость, применяемая на машиностроительном производстве, – СОЖ ЭГТ и выбранный наилучший по технологическим характеристикам состав водорастворимой полимерной СОЖ ВП-4 (созданной в процессе работы) [4].

На микроструктуре корня стружки (рис. 2) можно выделить зону максимальной пластической деформации зерен (позиция 1) и характер их течения.

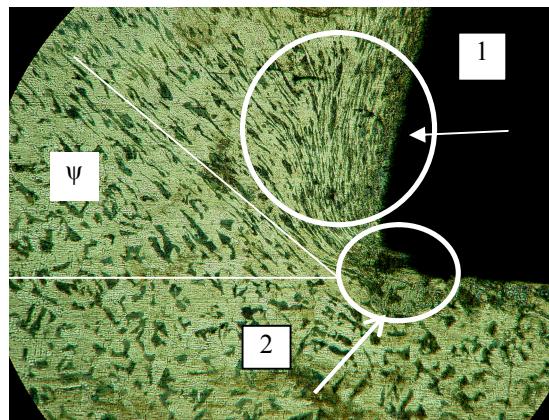


Рисунок 2 – Микроструктура корня стружки стали 20 в среде СОЖ ЭГТ ( $\times 800$ )

Ряды деформированных зерен металла относительно плоскости сдвига находятся под углом  $\psi$ , углом текстуры, и непосредственно вблизи поверхностного слоя. Такое расположение деформированных зерен вызывает поверхностное упрочнение, повышение микротвердости поверхностного слоя обработанной детали и стружки, что в свою очередь вызывает повышенный износ режущего инструмента.

На снимке (рис. 2, позиция 2) видно вырывание металла с поверхности резания резцом, приводящее к неровностям на обработанной поверхности. Данное явление приводит к шероховатости обработанной поверхности. Значение шероховатости обработанной поверхности в среде СОЖ ЭГТ показано на графиках зависимости шероховатости от скорости резания (рис. 3).

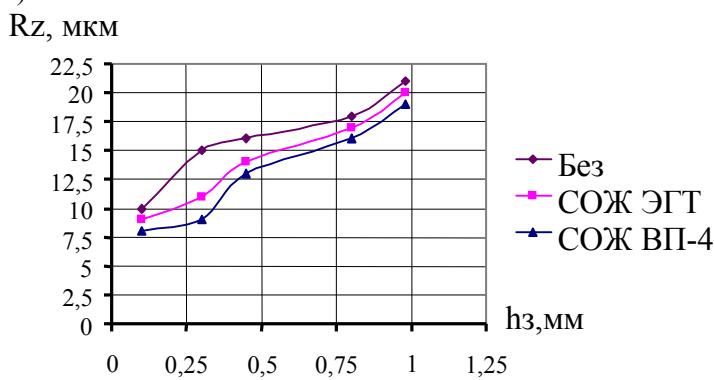


Рисунок 3 – Зависимость высоты микронеровностей ( $R_z$ ) обработанной поверхности от величины износа инструмента по задней поверхности ( $h_3$ ) при чистовом точении стали 20 резцом с твердосплавной пластиной Т15К6

Изучение микроструктуры корня стружки, обработанного в среде СОЖ ВП-4 (рис. 4), показало следующие результаты.

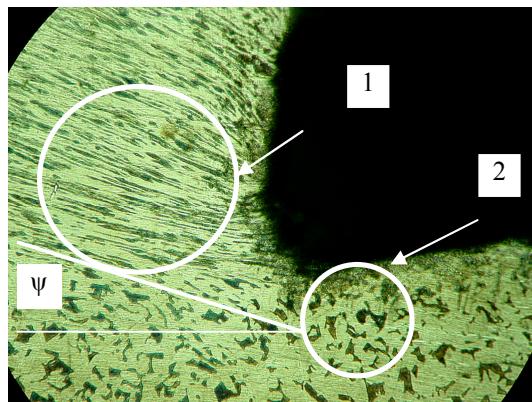


Рисунок 4 – Микроструктура корня стружки стали 20 в среде водорастворимой полимерной СОЖ ВП-4 ( $\times 800$ )

Меньшее значение угла текстуры подтвердило теорию об уменьшении значения силы трения под действием полимерной граничной пленки СОЖ ВП-4. Параллельность полос деформированных зерен металла стружки (рис. 4, позиция 1), при сохранении постоянства угла текстуры, свидетельствует об отсутствии вторичной деформации срезанного слоя, наложение деформированных зерен которого вызывает повышение микротвердости прирезцовой стороны стружки и абразивный износ инструмента. Разность значения степени наклена поверхностей, обработанных в различных средах, объясняется именно этим фактором (рис. 5).

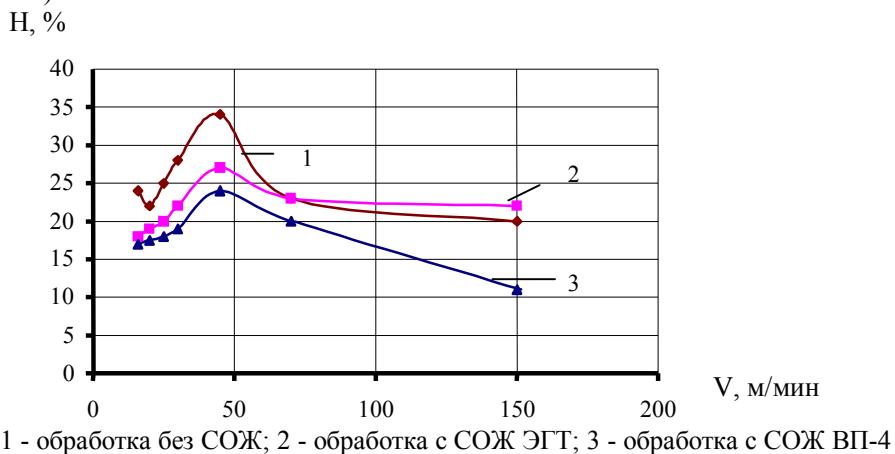


Рисунок 5 – Зависимость степени наклена ( $H$ ) от скорости резания ( $V$ ) при чистовом точении стали 20,  $t = 0,5$  мм,  $S = 0,12$  мм/об

Также на микроснимке корня стружки металла, обработанного в среде СОЖ ВП-4, был отмечен характер вида поверхности слоя, шероховатость (рис. 4, позиция 2). На снимке явно просматривается уменьшение высоты гребешков шероховатости.

Механизм действия полимерной водорастворимой СОЖ ВП-4 (рис. 6) заключается в том, что появляется расклинивающая сила  $P_p$ , результирующая данной силы, и  $N_p$  совпадает по вектору с направлением силы сдвигающей  $P\tau$ , что приводит к увеличению результирующей (суммарной силы)

$$N_{\Sigma} = N_p + P\tau . \quad (4)$$

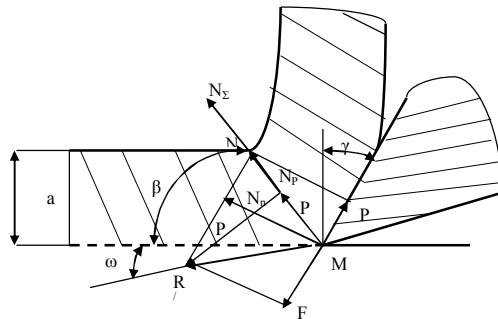


Рисунок 6 – Схема механизма резания с водорастворимой полимерной СОЖ ВП-4

Эта результирующая сила превышает предел текучести обрабатываемого материала, происходит его разрушение (рис. 7). Разрыв межкристаллических связей обрабатываемого металла под действием адсорбционной полимерной пленки СОЖ ВП-4 и давления самой жидкости приводит к расклинивающему действию в зоне резания, т.е. к эффекту Ребиндера.

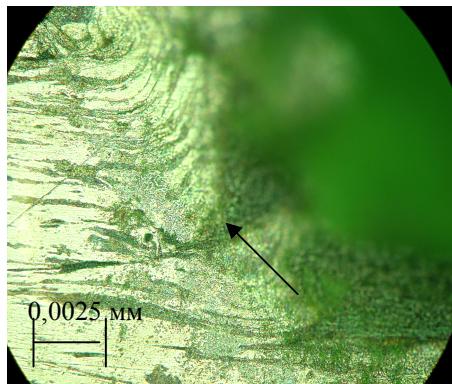


Рисунок 7 – Зона плоскости сдвига с образованием клина адсорбционной пленкой полимерной СОЖ ВП-4 ( $\times 2100$ )

Таким образом, можно сделать заключение, что механизм действия СОЖ зависит от химического состава и физических свойств жидкости с водорастворимыми полимерами.

Создание СОЖ на основе водорастворимых полимеров приводит к увеличению тепло-

отъема за счет высокой теплоемкости воды, присутствующей в них в значительном количестве. Происходит уменьшение температуры в зоне контакта, и за счет этого увеличивается стойкость режущего инструмента.

Присутствие в составе СОЖ многоатомных спиртов и поверхностно-активных веществ создает смазывающий эффект, что приводит к уменьшению силы трения и угла действия - это второй механизм действия СОЖ ВП-4. При этом понижается нагрузка на режущий инструмент и увеличивается срок его службы.

И третий механизм резания возможен из-за сочетания в СОЖ противоположных свойств, т.е. пониженного поверхностного натяжения и повышенной вязкости. Наличие в СОЖ одноатомных спиртов, органических кислот и солей уменьшает поверхностное натяжение жидкости и увеличивает смачиваемость поверхностей контакта, что создает возможность проникновения жидкости в микротрешины и способствует разрушению обрабатываемого материала. Присутствие в составе охлаждающей жидкости разветвленных высокомолекулярных цепей водорастворимых полимеров в сочетании с поверхностно-активными веществами позволяет значительно повысить кинематическую вязкость жидкости и за счет этого добиться возникновения расклинивающего эффекта, приводящего к эффекту Ребиндера.

Этот механизм резания зарекомендовал себя как наиболее эффективный для увеличения стойкости режущего инструмента.

#### Список литературы

1. Дерягин Б.В. Экспериментальное исследование сольвации поверхностей / Б.В. Дерягин, М.М. Кусаков // Изв. АН СССР. Сер. Химия. - 1937. - № 5. - С. 1119-1152.
2. Якушев А.И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения / А.И. Якушев, Л.Н. Воронцов, Н.М. Федотов. - М.: Машиностроение, 1986. - 350 с.
3. Костецкий Б.И. Механические процессы при граничном трении / Б.И. Костецкий, М.Э. Нагансон, А.И. Беригатский. - М.: Наука, 1972. - 170 с.
4. Пат. РК № 17885. Смазочно-охлаждающая жидкость для механической обработки металлов / Н.М. Комков, С.Д. Капаева; Опубл. 16.10.06, Бюл. № 10. - 2 с.

Получено 27.10.08

УДК 669.011

**М.К. Кылышканов, К.К. Комбаев**  
ВКГТУ, г. Усть-Каменогорск

#### МЕТОДЫ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

Задача повышения эксплуатационной надежности машин приобретает все большее значение в связи с увеличением механических, тепловых и других видов воздействий на детали. Для деталей, разрушение которых начинается с поверхности, разработано большое количество методов поверхностного упрочнения, основанных на нанесении покрытий или на изменении состояния (модификации) поверхности. Для упрочняющей термической обработки поверхности деталей машин и инструмента используют нагрев излучением от технологического лазера, электронных пушек или токами высокой частоты. Но высокая стоимость оборудования и низкая эффективность использования материально-энергетических ресурсов ограничивает применение этих технологий.

Наиболее перспективной технологией поверхностного упрочнения деталей является

метод электролитно-плазменной обработки, под которым понимают целенаправленное изменение свойств поверхности в результате технологического внешнего воздействия. При этом происходит изменение структуры материала в тонких поверхностных слоях вследствие физического воздействия (ионами высокотемпературной плазмы, электрического разряда и др.).

В электролитно-плазменной технологии передача электрической энергии к обрабатываемой поверхности изделия осуществляется от металлического анода через слой электролита и плазмы. Плазменный слой формируется из электролита в зазоре между жидким электролитом и электропроводной поверхностью изделия-катода. В качестве жидкого электрода используют электролит на водной основе.

Выбранный состав электролита и электрические режимы обработки обеспечивают создание поверхностного слоя с заданными физико-химическими свойствами, т.е. с повышенной твердостью, износостойкостью, коррозионной стойкостью.

В проведенных нами экспериментах использовались образцы из стали 45. В качестве электролита использовался водный раствор кальцинированной соды. Режимы обработки: время нагрева 2 с, пауза 4 с, общее время 2 мин,  $I=10\div40\text{A}$ ,  $U=300\text{V}$  (анод – сталь 40Х). На рисунке 1 показана структура обработанной поверхности катода-изделия, обработанного электролитной плазмой с анодом – стали 40Х.



Рисунок 1 – Структура поверхности катода-изделия, обработанного электролитной плазмой с анодом – сталь 40Х

Вследствие быстрого охлаждения в потоке электролита структура металла состоит, в основном, из мартенситной составляющей.

Рентгенофлюoresцентный анализ обработанной поверхности (рис. 2) показывает, что в поверхностном слое зарегистрировано наличие хрома в пределах до 1,5 %. Это свидетельствует о значительных диффузионных процессах, происходящих на поверхности металла, и переходе хрома из анода на поверхность исследуемого металла. Кроме того, в поверхностном слое имеются почти все элементы, которые присутствуют в растворе электролита и внедряются в поверхность. Содержание Ag объясняется применением серебряной втулки в установке рентгенофлюoresцентного анализатора.

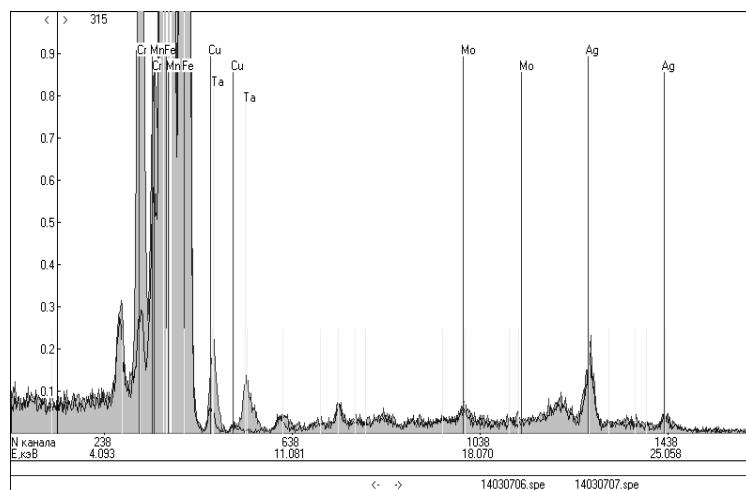


Рисунок 2 – Элементный состав поверхностного слоя образца, обработанного с использованием электролитно-плазменной технологии

Распределение микротвердости по глубине упрочненного слоя проводилось по косому шлифу. Показатели микротвердости упрочненного слоя (рис. 3) свидетельствуют о максимальном ее значении в поверхностном слое ( $H_V \approx 900$ ) и снижении в глубину металла. Установлено, что при указанных выше режимах обработки поверхности максимальное значение упрочненного слоя составляет до 50 мкм.

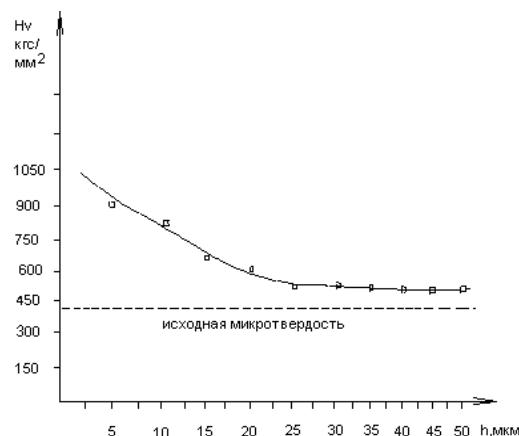


Рисунок 3 – Распределение микротвердости по глубине упрочненного поверхностного слоя

Таким образом, электролитно-плазменное упрочнение представляет собой комплексное воздействие на поверхностные и приповерхностные слои нагреваемых материалов, которое заключается в термическом, электрофизическом и химическом воздействиях.

#### Литература

- Погребняк А.Д. Успехи физики металлов / А.Д. Погребняк, Ю.Н. Тюрин, А.Г. Бойко и др. // НА Украины. – Т.6. – № 6. – Киев, 2005. – С.273 – 344.

Получено 10.11.08

50 лет

КУТТЫКТАЙМЫЗ !  
ПОЗДРАВЛЯЕМ !



**ЛАТКИНА**  
**ИВАНА ВАСИЛЬЕВИЧА,**  
кандидата физико-математических наук  
кафедры высшей математики

ЗДОРОВЬЯ, СЧАСТЬЯ, УСПЕХОВ, ДОРОГОЙ ЮБИЛЯР !

•  
МЕРЕЙТОЙ ИЕСІНЕ МЫКТЫ ДЕНСАУЛЫК, ТАУСЫЛМАС БАҚЫТ,  
ШЫҒАРМАШЫЛЫК ТАБЫС ТІЛЕЙМІЗ !

УДК 519.6

**А.А. Макенов, И.В. Цыбенко**

ВКГТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ВОДИТЕЛЕМ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Исследования, проведенные в разных прикладных областях деятельности человека, доказывают, что качество решений в значительной степени зависит от психологического

типа лица, принимающего решение. Человек выступает как основной элемент системы «водитель-автомобиль-дорога-среда», который самостоятельно осуществляет контроль и управление (принятие решений). При этом водитель транспортного средства осуществляется измерение параметров среды или состояния системы в целом, сравнивает их с допустимыми параметрами, принимает решение по их ограничению с помощью соответствующих имеющихся средств.

Крайне важным в поведении человека является его чувствительность к назревающей критической ситуации, т.е. какая минимальная интенсивность раздражителя может быть замечена, а какие раздражители, уровень которых достаточно высок для обнаружения, остаются незамеченными. В существующих условиях при подготовке водителей транспортных средств в учебных заведениях это обстоятельство не учитывается, и будущие водители не проходят подобное тестирование. Предвидеть ситуацию значительно важнее, чем выходить из нее, когда она уже практически возникла. Для исследования данной проблемы привлекается статистическая теория решений. Исследования, проведенные во многих работах, показали, что «решительный» человек всегда максимизирует свои решения, что ведет также к очень большому числу ложных решений. Предельно «осторожный» человек вообще никогда не дает ложных решений, но одновременно пропускает много ситуаций, имевших место.

Главная проблема в оценке и прогнозировании поведения человека в той или иной ситуации состоит в сложности математического описания процесса принятия решений в критических ситуациях с учетом психологического типа личности. К подобным процессам, в первую очередь, следует отнести процесс управления транспортным средством [1, 2].

Как установлено в работе М.Ю. Широкой [3], можно выделить несколько этапов поведения, через которые проходит водитель транспортного средства прежде, чем он достигнет высокого уровня безопасного управления:

1. Преодоление постоянного чувства опасности. Этот этап длится первые дни, иногда даже недели и требует большого психического напряжения. У начинающего водителя транспортного средства преобладает чувство новизны стоящих перед ним задач, для решения которых нет ни знаний, ни опыта. Поэтому он старается избегать критических и конфликтных ситуаций.

2. Недооценка опасности. В результате уклонений от критических обстоятельств на первом этапе водителю транспортного средства не приходилось сталкиваться с грубыми формами поведения на дороге или попадать в ДТП. Это обстоятельство может ложно приниматься за собственное водительское «мастерство», выражющееся в рискованной манере управления транспортным средством. Этап длится в течение 3,5-4 тыс. км пробега.

3. Коррекция повышенного чувства безопасности. Накопленный практический опыт управления транспортным средством постепенно снижает чувство безопасности. Однако это чувство все еще остается обманчивым.

4. Объективная оценка опасности. При этом приобретенные навыки и опыт управления транспортным средством помогают не забывать об опасностях на дороге.

5. Снижение чувства безопасности соответствует первым 3-4 годам управления транспортным средством или 100 тыс. км пробега. Этот феномен психологи объясняют так: высокий уровень профессионального мастерства водителей транспортных средств может привести к притуплению бдительности и потере осторожности. Статистика показывает,

что самые тяжелые ДТП чаще происходят с опытными водителями. Это лишний раз свидетельствует о том, что на безопасность дорожного движения влияет не столько опыт управления транспортным средством, сколько психологические особенности человека.

Качество принимаемых решений в процессе управления транспортным средством является композицией многоэтапных процедур в быстро меняющихся условиях. Все факторы внешнего и внутреннего происхождения, события и процедуры, нормативные установки (дорожные ограничения), влияющие на процесс принятия решений, являются по своей природе объектами вероятностными, количественно оцениваемыми случайными величинами. Некоторые из них могут быть в определенной степени контролируемы и управляемы, но значительная доля из них слабо управляема или совсем неуправляема. Прогнозирование результата принятия решения значительно усложняется еще и тем, что большинство процессов и факторов по своей природе являются нелинейными.

На уровень рисков в процессе принятия решений водителем транспортного средства оказывают влияние следующие факторы [4]:

- законы распределения случайных факторов, событий, входной информации в системе принятия решений, параметры законов распределения;
- статистические характеристики методики и средств измерения входной информации;
- статистические свойства нормативных значений;
- психологический образ водителя транспортного средства.

Так как решение является в большей или меньшей степени величиной случайной, то его можно количественно представить функцией распределения, подчиняющейся определенному закону. Для решения сформулированной задачи нами были приняты следующие гипотезы о форме распределений результатов принимаемых решений в зависимости от психологического типа:

- пессимист – сверхосторожный человек, который излишне перестраховывается в решениях, и закон плотности распределения его решений принят в виде отрицательной экспоненты;
- оптимист – полная противоположность первому, и закон распределения принят в виде положительной экспоненты;
- тип полной некомпетентности и безразличия к решаемой проблеме, плотность распределения соответствует равномерному закону;
- лицо, принимающее решения с позиций «здравого смысла», закон распределения нормальный.

Для описания всех перечисленных функций распределения можно использовать закон Вейбулла. Как показали многочисленные исследования, данный закон является не только одним из распространенных в прикладных задачах, но и приемлемым инструментом для целей моделирования других законов.

Функция плотности распределения закона Вейбулла имеет следующий вид:

$$f(S, \alpha, \beta, \gamma) = \frac{\beta}{\alpha} (S - \gamma)^{\beta-1} e^{-\frac{(S-\gamma)^\beta}{\alpha}}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – параметр масштаба;  $\beta$  – параметр формы;  $\gamma$  - параметр положения.

При параметре формы распределении  $\beta = 0,5$  он соответствует экспоненциальному закону, при  $\beta = 2,5$  - закону Релея, а при  $\beta = 3,25$ , форма распределения Вейбулла близка к нормальному закону, что довольно часто используют в исследованиях. Однако достоинство закона Вейбулла состоит еще и в том, что он в отличие от нормального закона имеет

аналитическую форму интегрального закона распределения, которая имеет вид

$$F(S) = 1 - e^{-\frac{(S-\gamma)^{\beta}}{\alpha}}. \quad (2)$$

Основной целью моделирования приведенных выше ситуаций является количественная оценка уровня вероятных рисков принятия решений, возможность прогноза риска для каждой из композиций допустимых вариантов.

Графическая интерпретация результатов машинного эксперимента, как одного из частных случаев, приведена на рис. 1.

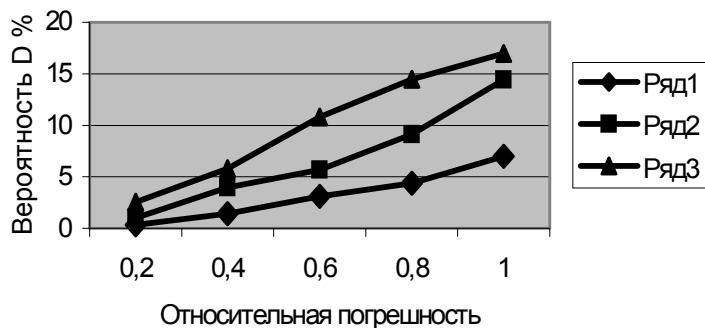


Рисунок 1 – Достоверность принимаемых решений при равномерном (1), оптимистическом (2) и нормальном (3) законах распределения решений

Как следует из рисунка, минимальный риск (максимальная достоверность) наблюдается при нормальном распределении решений – «здравый смысл» (верхняя кривая), максимальный риск – при равномерном распределении (нижняя кривая), и средняя кривая соответствует оптимисту (пессимисту) в зависимости от ситуации. Равенство рисков в последнем случае не означает равенства потерь в реальной ситуации, так как здесь необходимо переходить к результативной оценке вероятных потерь в каждом конкретном случае.

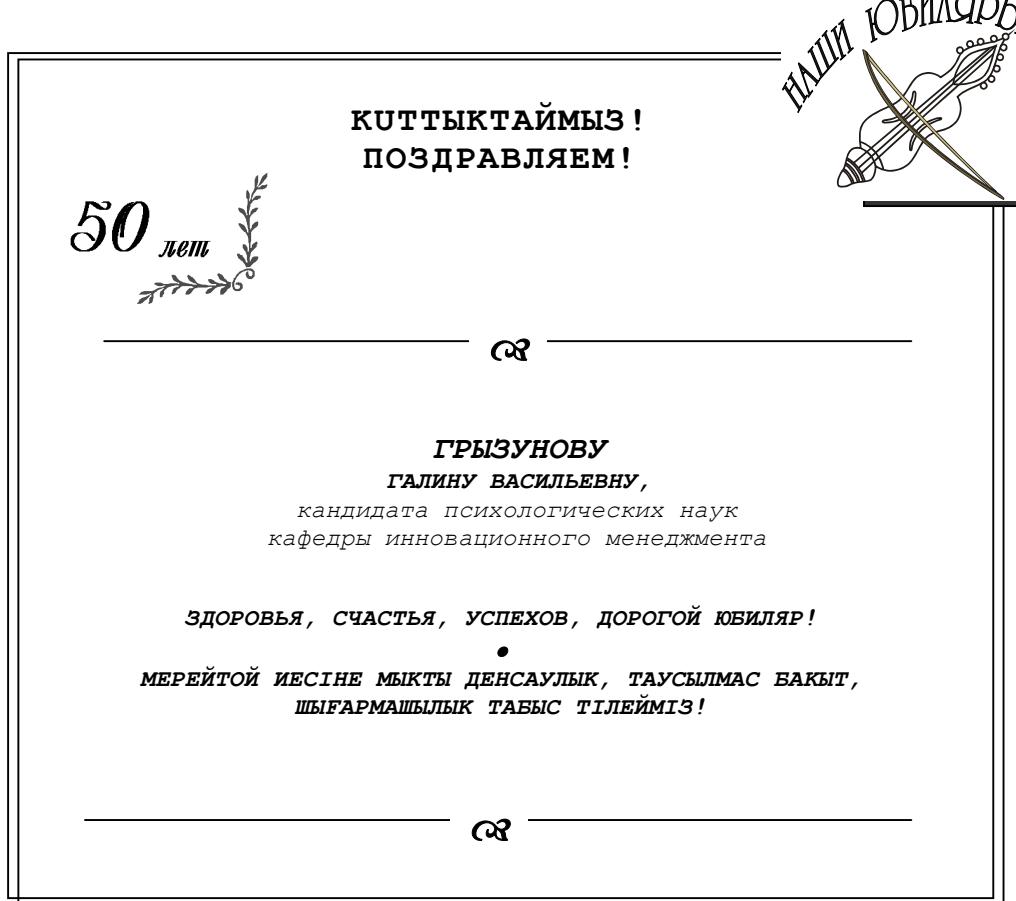
Данная модель является элементом информационно-аналитической системы подготовки водителей транспортных средств. Стремительный рост парка автотранспортных средств Республики Казахстан обуславливает увеличение количества ДТП. Это, в свою очередь, определяет необходимость дальнейшего совершенствования методики профессиональной подготовки водителей транспортных средств.

В учебные планы и программы подготовки водителей транспортных средств в обязательном порядке необходимо ввести ряд новых учебных дисциплин, и в частности «Основы автотранспортной психологии». На данный момент эта дисциплина не преподается в учебных заведениях, что в условиях интенсивного дорожного движения приводит к резкому увеличению так называемого человеческого риска.

#### Список литературы

1. <http://comavto.ru/>
2. Корнев В.А. Оценка и прогнозирование качества принятия решений с учетом психологических факторов//Качество-стратегия XXI века: Материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. - Томск, 2004.
3. <http://www.biophys.msu.ru>.
4. Моделирование поведения человека искусственного интеллекта – ME-LOS / <http://psyfactor.org/melos.htm>

Получено 21.10.08



УДК 389: 621.391

**Г.М. Мутанов**  
ВКГТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск  
**Ю.Н. Кликушин**

ОГТУ, Россия, г. Омск

**К.Т. Кошеков**

СКГУ им. М. Козыбаева, г. Петропавловск

### УПРАВЛЕНИЕ ПОДЪЕМНО-ПОВОРОТНЫМ УСТРОЙСТВОМ В УСЛОВИЯХ ВЛИЯНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СРЕДЫ И НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОМЕХ

Для проведения гидроакустических исследований в морском и рыбопромысловом деле, системах гидролокации и связи, геологии и военной технике активно возрастает необходимость использования высокоеффективных и помехоустойчивых технических средств, а также их систем управления для обеспечения эффективной работы с учетом особенностей гидродинамической среды. Одним из распространенных устройств исследовательского оборудования, нашедшим широкое применение в вышеперечисленных областях, являются ступенчатые подъемно-поворотные устройства (ППУ). Из известных разработок наиболее эффективна и оптимальна ППУ-6 «Океан» (рис. 1).

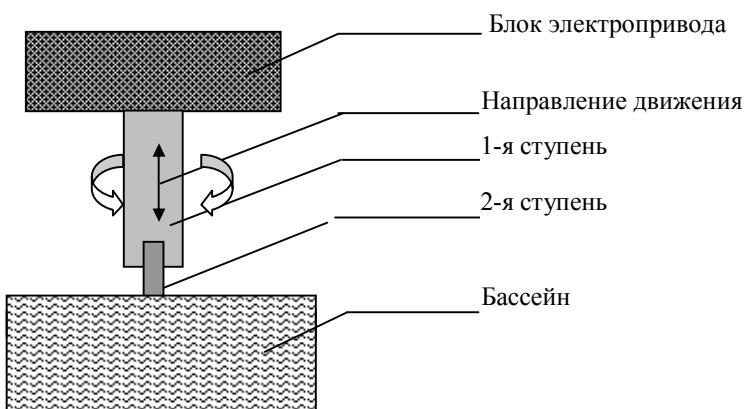


Рисунок 1 – Схема работы подъемно-поворотного устройства

В настоящее время, в связи с существенными достижениями в области исследования гидросреды, к ППУ-6 предъявляются требования по необходимости обеспечения высокой точности (до  $0,1^\circ$  и 0,1 мм), устойчивости и стабильности в работе при влиянии гидродинамической среды и помех. Причем влияние помехи особенно опасно, когда в системе присутствуют элементы с нелинейными статическими характеристиками типа насыщения (например в усилителях электроприводов). Вследствие гармонического сглаживания указанной нелинейности эквивалентная доброкачественность контура управления может снизиться до значений, приводящих к потере управляемости объектом. Особенно это опасно, когда объект управления в разомкнутом состоянии оказывается неустойчивым. Возмущающие воздействия гидродинамической среды и помехи изменяются случайным образом, причем в системах управления их разделение невозможно. В настоящее время борьба с ними в контуре управления ведется различными способами, в основном путем включения линейных фильтров различного рода. Однако, как показывает практика, их использование существенно ухудшает амплитудные и фазовые параметры контура. При проведении экспериментальных исследований [1] на ОАО «ЗИКСТО» было установлено, что точ-

ность позиционирования снижается на 25 % из-за невозможности точного измерения случайных сигналов с выхода датчиков позиционирования.

Решение задач обеспечения высокоточного управления в условиях существенного влияния гидродинамической среды и помех связано с необходимостью автоматизации подъемно-поворотного устройства с эффективным алгоритмом адаптации, что возможно с применением корректирующих устройств (КУ). Основу системы автоматизированного управления составляет персональный компьютер (ПК) со встроенной в него интерфейсной платой и набором специализированных программ. Интерфейсная плата предназначена для ввода-вывода аналоговых и цифровых сигналов и включает в себя буферные усилители, приемопередатчики и селектор адреса и микроконтроллер. Предлагаемая автоматизированная система управления ППУ-6 состоит из трех одинаковых контуров управления: поочередное вертикальное перемещение штанг первой и второй ступенями и угловое пространственное вращение. Структурная схема контура представлена на рисунке 2 (ДП1 – датчик перемещения, СТ – ступень, ОУ – объект управления, М(т) – возмущающее воздействие, Н(т) - помехи измерения).

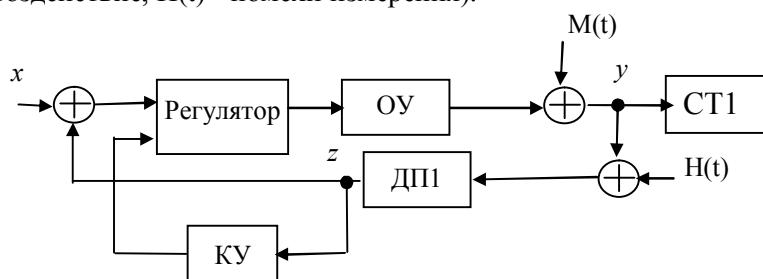


Рисунок 2 – Структурная схема управления ступенью с корректирующим устройством

В основе алгоритма управления автоматизированной системой лежит следующий закон изменения управляемого воздействия [1]:

$$F = k_f (k_0 + k_H x + k_V \dot{x}^2) + F_K, \quad (1)$$

где

$$k_0 = \frac{\dot{x}_k^2 - \dot{x}_0^2}{2(x_k - x_0)} \left(1 - \frac{x_0}{\Delta_x}\right) + \frac{\dot{x}_0^2}{2\Delta_x};$$

(2)

$$k_H = \frac{\dot{x}_k^2 - \dot{x}_0^2}{2\Delta_x(x_k - x_0)}; \quad k_V = -\frac{\text{sign}(\dot{x})}{2\Delta_x},$$

где  $F$  – управляемое воздействие,  $k_0, k_H, k_V$  – параметры регулятора,  $k_f$  – коэффициент усиления регулятора.

Исходными данными системы управления каждой ступенью являются точность позиционирования  $\Delta_x$ , начальные координата и скорость  $x_0, \dot{x}_0$ , конечные координата и скорость  $x_k, \dot{x}_k$ , направление движения  $\text{sign}(\dot{x})$ , а измеряемыми величинами – текущая координата и скорость  $x, \dot{x}$ .

Значения  $F_K$  и  $k_f$  с выхода корректирующего устройства зависят от влияния возмущающих воздействий и помех. В результате проведенных экспериментальных исследова-

ний было установлено, что изменениями (или коррекциями) этих параметров возможно обеспечение независимости работы системы управления от возмущающих воздействий и помех. Авторами предложена следующая методика, основанная на методологии идентификационных измерений сигналов, описанной в [2].

По сигналам с выхода датчика  $z(t)$  определяются идентификационные параметры сигнала  $NF$  (характеризующий форму - распределение мгновенных значений после дискретизации сигнала) и  $K$  (характеризующий вариабельность - распределение временных интервалов после квантования) по следующим выражениям:

$$NF = \left[ \frac{(\text{Размахсигнала})_N}{\text{СКОсигнала}} \right]^2 = \left[ \frac{\max\{z_i\} - \min\{z_i\}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_i - Z)^2}} \right]^2, \quad (3)$$

где  $Z$  – среднее значение;  $N$  – количество выборок сигнала;

$$K = \frac{\overline{|\Delta z(t)|}}{\overline{|z(t)|}}, \quad (4)$$

где  $\overline{|\Delta z(t)|}$  - средний модуль приращений сигнала,  $\overline{|z(t)|}$  - средний модуль сигнала.

По полученным значениям  $NF$  и  $K$  на основе идентификационной шкалы, составленной экспериментально в виде таблицы при ( $N = 1000$ ), определяются методом аппроксимации значений  $F_K$  и  $k_f$ . В частности,  $F_K$  по следующим классическим законам управления:

– пропорционально-интегральному (ПИ)

$$F_K = (k_{II} + \frac{k_{II}}{p})z, \quad (5)$$

где  $k_{II} = 5,7$ ;  $k_{II} = 12,5$ ;

– пропорционально-дифференциальному (ПД)

$$F_K = (k_{II} + k_D p)z, \quad (6)$$

где  $k_{II} = 3,2$ ;  $k_D = 8,5$ .

Параметр  $k_f$  изменяется в пределах  $(1 \div 2,7)$ , и выбор конкретного значения определяется также путем аппроксимации по таблице.

Автоматизированная система управления подъемно-поворотным с интеллектуальным корректирующим устройством внедрена на АО «ЗИКСТО» (г. Петропавловск) при выполнении научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы «Разработка и создание высокоточной (до  $0,1^\circ$  и  $0,1$  мм) системы управления подъемно-поворотным устройством исследовательской приемно-излучающей гидроакустической аппаратуры», выполненной по заданию Ичанского института измерительной техники (КНР).

Идентификационные параметры		Корректирующий параметр	Коэффициент усиления
$NF$	$K$	$F_K$	$K_f$
2	$0 \div 1$	ПИ	1,25
8	$0 \div 1$	ПИ	1,45
12	$0 \div 1$	ПД	1
24	$0 \div 1$	ПИ	1,75
40	$0 \div 1$	ПИ	1,5
60	$0 \div 1$	ПД	1,5
100	$0 \div 1$	ПД	1,5
2	$1 \div 3$	ПИ	1
8	$1 \div 3$	ПД	1,2
12	$1 \div 3$	ПД	1,3
24	$1 \div 3$	ПД	2,7
40	$1 \div 3$	ПД	1,5
60	$1 \div 3$	ПИ	1,5
100	$1 \div 3$	ПИ	1,5

## Список литературы

1. Авдеев В.Н. Разработка, исследование и внедрение системы точного позиционирования многомерного гидродинамического объекта: Дис. ... канд. техн. наук. - Петропавловск, 2006.
2. Кликушин Ю.Н. Методы и средства идентификационных измерений сигналов: Монография / Ю.Н. Кликушин, К.Т. Кошеков. - Петропавловск: Изд-во СКГУ им. М. Козыбаяева, 2007. - 186 с.

Получено 26.11.08

УДК 662.997.

### Б.Ж. Туркпенбаева

#### АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГЕЛИОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ И ИХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПОМОЩЬЮ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

О значении Солнца для всего человечества можно понять из слов знаменитого датского ученого, лауреата Нобелевской премии М. Финзена, который подчеркивал: «Ничто не заменит солнечного света. Он всегда будет единственным, необходимым и неподражаемым источником для живой клетки».

К тому же Национальный флаг независимого Казахстана олицетворяет изображение Солнца – первопричины всех процессов, из которых складывается климат, оказывающий решающее влияние на формирование комфортной среды обитания человека. Еще тысячетысячелетия назад человек понял, что жизнь и энергию дает Солнце. Среди возобновляемых источников энергии солнечная радиация по масштабам ресурсов, экологической чистоте и повсеместной распространенности наиболее перспективна.

Использование солнечной энергии в настоящее время сводится в основном к производству солнечного низкопотенциального тепла с помощью простейших плоских солнечных коллекторов. Так, в США в 2002 году из 3,8 млн ГДж энергии, произведенной за

счет солнечной энергии, 3,7 млн ГДж энергии представляет собой низкопотенциальное тепло, использованное для горячего водоснабжения, подогрева воды в плавательных бассейнах и в меньшей степени для отопления. Тепловая производительность такой установки существенно зависит от инсоляции, температуры окружающего воздуха, от конструктивного решения применяемых высокоэффективных селективных покрытий и других климатических факторов. В зависимости от широты местности и климатических условий годовой приход солнечной энергии на 1 м<sup>2</sup> поверхности изменяется очень сильно. Для широт около 30° он может составлять 8-10 ГДж/(м<sup>2</sup>·год), тогда как для широт 50-60° с.ш. падает до 2-4 ГДж/(м<sup>2</sup>·год). КПД солнечного коллектора определяется его оптическими характеристиками, качеством тепловой изоляции, инсоляцией и температурами теплоносителя и окружающего воздуха. Таким образом, в любой стране целесообразно с экономической точки зрения использование для некоторых целей неисчерпаемого источника энергии - Солнца, не загрязняющего окружающую среду.

Республика Казахстан расположена почти в центре Евразии (между 39°49' – 55°49' с.ш. и 46°28' – 87°18' в.д.) в глубине материка на практически равном удалении от Атлантического и Тихого океанов. Территория страны по величине является девятой в мире, общей площадью 2724,9 тыс.км. Его протяженность с запада на восток равна примерно 3000 км, с севера на юг – примерно 1800 км. С севера и запада Казахстан граничит с Россией, с юга – Киргизстаном, Узбекистаном и Туркменистаном. С востока к стране прилегает Китай.

Мангистаускую область отличает резко континентальный климат, засушливое продолжительное лето, низкая относительная влажность и, наконец, малая облачность, что благоприятствует интенсивности проникновения лучей к земной поверхности. Умеренная географическая широта (42°с.ш.), отсутствие лесного покрова, весьма слабая облачность и продолжительность солнечного сияния обуславливают большой приток солнечного тепла. Так, средняя плотность потока лучистого теплообмена, поглощенного поверхностью Земли на широте города ( $\approx$ 41°с.ш.) Новый-Узень, составляет 13 ккал/(см<sup>2</sup>·месяц), или 210 Вт/м<sup>2</sup>, что свидетельствует о самой наибольшей инсоляции по РК.

В настоящее время множество ученых, исследователей и инженеров работают в области разработок, анализа конструкций, повышения энергетической эффективности гелио-приемных устройств, среди которых основное место занимают коллекторные системы типа «горячий ящик» [1]. Солнечные гелиоприемные устройства можно условно разделить на три основные группы: низко-, средне- и высокотемпературные [1]. Такая классификация основана на делении диапазона температур рабочих веществ, жидкостей или растворов, нагреваемых в них:

- низкая температура до 40 °C (313 K);
- средняя температура до 100 °C (373 K);
- высокая температура выше 100 °C.

Количество тепла, собираемого гелиоприемником, можно определить из общего уравнения энергетического баланса:

$$Q_c = Q_i + Q_p + Q_m, \quad (1)$$

где  $Q_c$  – тепло, собираемое коллектором;

$Q_i$  – тепло, используемое коллектором;

$Q_p$  – потери тепла коллектором;

$Q_m$  – количество тепла, поглощенного массой конструкции.

Если применяются только такие гелиоприемники, которые не имеют достаточной теплопроводности для сохранения тепла, то поглощенное массой конструкции тепло будет равно нулю ( $Q_m = 0$ ) и уравнение (1) будет следующим:

$$Q_c = Q_i + Q_p. \quad (2)$$

Эффективность гелиоприемника равна соотношению полезной энергии  $Q_i = (Q_c - Q_p)$  к общей энергии, падающей на него  $Q$ , тогда

$$\eta = [(Q_c - Q_i)/Q] \cdot 100. \quad (3)$$

Общее количество энергии  $Q$  включает как прямое, так и рассеянное (диффузное) излучение.

$$Q = I_D + I_d, \quad (4)$$

где  $I_D$  - количество прямого солнечного излучения, падающего на перпендикулярную поверхность приемника;  $I_d$  - количество рассеянной солнечной радиации. Из уравнения (3) видно, что эффективность гелиоприемника в большей степени определяется значением числителя, который прямо зависит от его конструкции. Когда рабочее вещество, жидкость или растворы должны иметь температуры близкие к температуре окружающей среды, то целесообразным является использование низкотемпературных гелиоприемников. Расход жидкости в гелиоприемнике поддерживается на таком уровне, чтобы перегрев не превышал 10 - 15 °C относительно окружающей среды. В климатических зонах, где средняя летняя температура составляет +25 ÷ +30 °C, общая рабочая температура конструкции может составить 35 - 40 °C. Потери тепла  $Q_p$  сильно зависят от общей температуры рабочих веществ, жидкости (или раствора). Так как в низкотемпературных гелиоприемниках общая температура рабочей жидкости относительно окружающей среды незначительна, то и потери тепла  $Q_p$  будут незначительны, что позволяет избежать применения в таких конструкциях изоляции и оставить только один основной элемент конструкции - поглотитель энергии - трубку, которая является одновременно и теплопередающим элементом [2].

Низкотемпературные гелиоприемники по стоимости гораздо экономичнее гелиоприемников других групп. Рассмотрим возможные способы построения конструкций низкотемпературных гелиоприемников.

При разработке и проектировании гелиоприемников подобной группы необходимо учитывать следующие требования: соответствующий контур протекания рабочей жидкости, эффективное поглощение солнечной энергии и эффективная передача улавливаемой гелиоприемником энергии к рабочей жидкости, невысокая стоимость конструкции, повышенный срок службы и надежность работы. Соответствующий контур протекания рабочей жидкости (коллекторный или змеевиковый способ соединения трубок, число ходов рабочей жидкости в гелиоприемнике, плотность укладки труб на единице поверхности) выбирается из величины расхода и условий естественного протекания (рис.1). В поперечном сечении, перпендикулярном движению рабочей жидкости, трубка-поглотитель может иметь различную геометрическую конфигурацию в виде простых профилей (круглого, треугольного, прямоугольного, овального, эллиптического и т.д.), ориентируемых большей стороной к потоку солнечной радиации. Поглотитель может выполняться из металла или пластика.

Требования к эффективной абсорбирующей способности поверхности поглотителя можно удовлетворить, применяя селективные покрытия обогреваемой части.

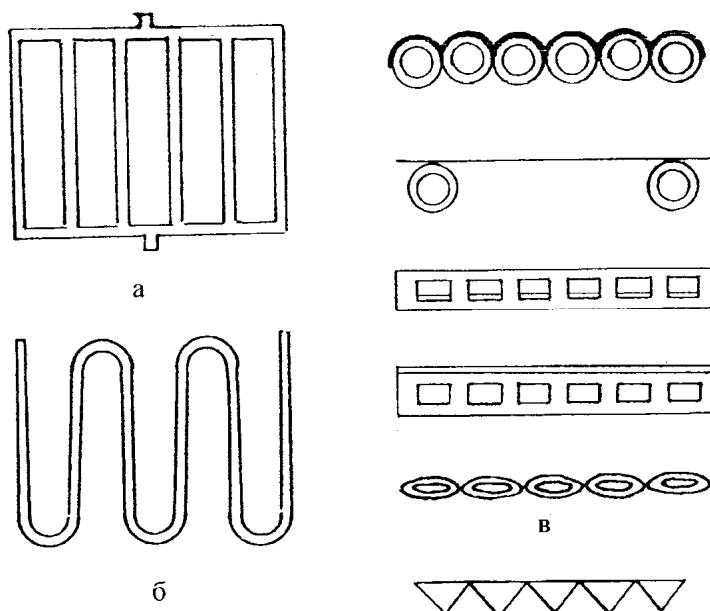


Рисунок 1 – Низкотемпературные гелиоприемные устройства: а - коллекторное соединение трубок, б - змеевиковое соединение трубок, в - профили трубок-поглотителей и нанесение селективных покрытий

Существует несколько возможных вариантов нанесения слоя селективного покрытия, если основной материал, из которого сделан поглотитель, – прозрачный пластик. Селективное покрытие наносится или на верхней (поверхности) части трубы, или покрывается нижняя внутренняя поверхность, омываемая прозрачной рабочей средой. Последний способ нанесения селективного покрытия удовлетворяет в полной мере требованию об эффективном переносе поглощаемого тепла к рабочей жидкости.

Однако в таких конструкциях теплоперенос полностью зависит от теплопроводности пластика и толщины стенок конструкции.

Если омываемая среда непрозрачная, например водные растворы некоторых солей, то в прозрачных конструкциях поглотителей для лучшего восприятия и переноса тепловой энергии в жидкость можно добавить красители черного цвета.

Если конструкция поглотителя металлическая (médная или стальная), то селективные покрытия наносятся сверху, что также улучшает перенос тепла.

Рассмотренные конструкции низкотемпературных гелиоприемников просты в изготовлении, экономичны, легки и имеют достаточно высокий коэффициент полезного действия при правильном регулировании скорости расхода рабочей среды. Такие конструкции можно применять при непосредственном нагреве воды, для обогрева испарителей тепловых насосов, в отопительных системах и кондиционировании. Тем не менее, вышеперечисленные особенности конструкции низкотемпературных гелиоприемников в основных чертах сохраняются и в других группах гелиоприемников.

К среднетемпературным гелиоприемникам можно отнести конструкции, выполненные по типу «горячего ящика». Такие конструкции употребляются для повышения температуры рабочей жидкости до 100 °C, при которой закипает вода или десорбируются бинарные растворы [2]. Повышение температурного уровня приводит и к повышению в уравнении теплового баланса (1) потерь тепла  $Q_p$ , что отрицательно сказывается на эффективности гелиоприемника (3). Поэтому в конструкциях среднетемпературных гелиоприемников необходимо применять изоляцию с высоким термическим сопротивлением, окружающую контур поглотителя с нижней стороны. Чтобы уменьшить потери тепла с верхней стороны контура поглотителя, обогреваемого солнцем, необходимо ограждать нагреваемые элементы одним или более слоями прозрачных крышек. Это создает так называемый оранжерейный (парниковый) эффект и слой термоустойчивого неподвижного воздуха. Нижний и верхний изоляционные слои, а также сам контур поглотителя должны быть конструктивно заключены в каркас, который для уменьшения боковых потерь тепла тоже должен изолироваться.

Такая конструкция является габаритной, материалоемкой и по стоимости значительно дороже, чем гелиоприемники первой группы. Кроме того, в таких конструкциях накладываются дополнительные условия при установке и выборе контура протекания рабочей жидкости из-за возможного образования паровых пробок в случае применения системы для непосредственной десорбции раствора.

На рис. 2 представлена конструкция среднетемпературного гелиоприемника, выполненного по типу «горячий ящик».

Третья группа включает в себя конструкции, у которых солнечное излучение фокусируется в поглотителе и которые, следовательно, должны быть обеспечены, по сравнению со среднетемпературными, устройством для преломления солнечных лучей [3].

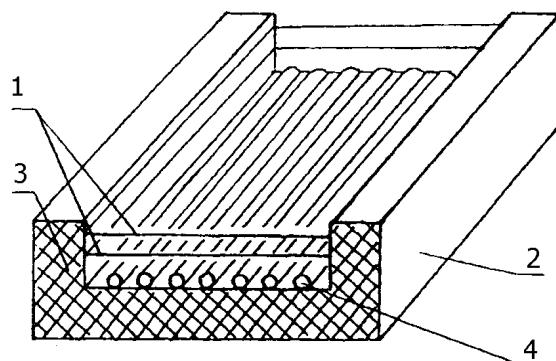


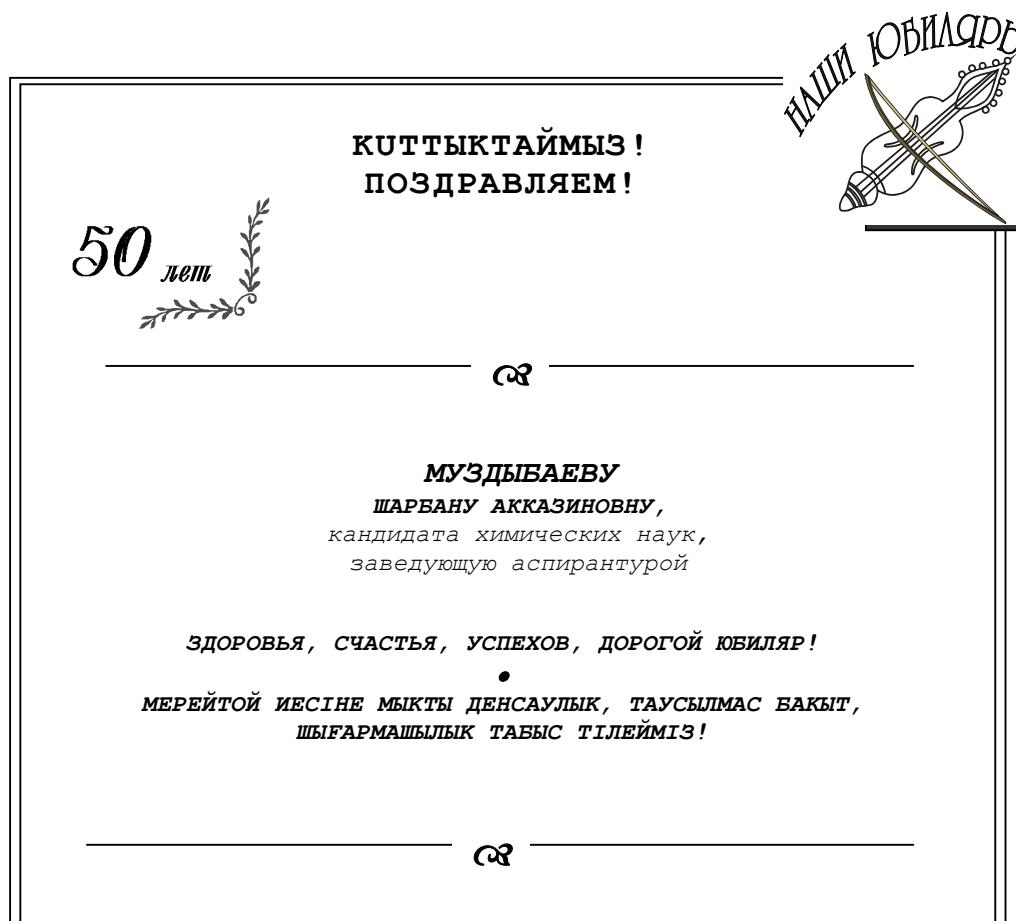
Рисунок 2 – Среднетемпературный гелиоприемник: 1 – прозрачные крышки, 2 – каркас, 3 – теплоизоляция, 4 – трубы-поглотители

Очевидно стоимость и сложность изготовления гелиоприемников третьей группы значительно выше, чем первых двух групп. Высокотемпературные гелиоприемники также можно успешно применять там, где непосредственно необходима очень высокая температура или для обеспечения подходящих рабочих температур на входе тепловых устройств, эффективность которых зависит непосредственно от разницы в температуре между входом и выходом.

Список литературы

1. Руденко М.Ф. Разработка и исследование эффективности экологически безопасной адсорбционной гелиохолодильной установки / М.Ф. Руденко, Ю.В. Чивиленко, В.И. Черкасов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. - 2006. - № 8. - С.26-28.
2. Руденко М.Ф. Повышение энергетической эффективности экологически безопасных гелиохолодильных установок / М.Ф. Руденко, Ю.В. Чивиленко, А.Е. Антипов // Вестник Международной академии холода. - 2006. - №3. - С.3-8.
3. Корбанов Г.П. Установки для использования солнечной энергии. - М.: Изд-во МЭИ, 1996. - 112 с.
4. Руденко М.Ф. Моделирование и разработка энергосберегающих гелиоэнергетических комплексов для получения тепла и холода / М.Ф. Руденко, Б.Ж. Туркленбаева // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. Дек. 2006. - Волгоград: Изд-во ВСХА, 2006.
5. Руденко М.Ф. Моделирование и анализ концентраторов солнечной энергии для гелио приемных устройств / М.Ф. Руденко, Б.Ж. Туркленбаева // Вестник АГТУ. - 2006. - № 6(35). - С.136-142.
6. Руденко М.Ф. Разработка и внедрение гелиоэнергетической техники для отопления и горячего водоснабжения / М.Ф. Руденко, Б.Ж. Туркленбаева // Материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. «Экология и безопасность жизнедеятельности». Раздел «Ресурсо-энергосбережение – фактор экологической и техногенной безопасности», дек. 2006 г. - Пенза: Изд-во ПДК, 2007. - С. 83-85.

Получено 20.11.08



**ISSN**

**1561-4212.**

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

**«ВЕСТНИК**

**77**

**ВКГТУ»**

**№**

**4,**

**2008.**

---

УДК 624.131.533

**Р.Р. Хайбуллин**  
КарГТУ, г. Караганда

### ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ МОЩНОСТИ И СКОРОСТИ ТРАНШЕЙНЫХ МАШИН

Процесс устройства траншейных фундаментов характеризуется различными организационно-технологическими параметрами, совокупность которых определяет условия строительства. Эти параметры формируют общие экономические показатели, по которым оценивается эффективность строительного процесса. Установление взаимосвязей между параметрами строительного процесса – главная задача аналитического исследования.

После формирования множества технологических вариантов производства работ, разделения их на подмножества в зависимости от типов машин, выполняющих ведущую операцию, исследовалась функция приведенных затрат  $\Pi_{3.o}$ . В результате математических преобразований получена зависимость (1) [1]

$$\Pi_{3.o} = \sum \left( a + \frac{b}{V} + \frac{cN}{V} \right), \quad (1)$$

где  $a$  – параметр, характеризующий условно-постоянную часть приведенных затрат на объем работ;  $b$  – величина, определяющая изменение приведенных затрат в зависимости от стоимостного выражения скорости проходки;  $c$  – параметр, характеризующий влияние удельной энергоемкости на приведенные затраты;  $N$  – реализуемая мощность землеройной машины;  $V$  – скорость подачи рабочего органа.

На этапе оптимизации гипотетических (или проектируемых) рабочих органов, для которых еще невозможно определить капиталовложения в базовую машину, критерий «приведенные затраты» снижается до части себестоимости, не зависящей от капиталовложений

$$c' = a_1 + \frac{b_1}{V} + \frac{c_1 N}{V}. \quad (2)$$

Общий вид функций приведенных затрат и себестоимости (1) и (2) остается неизменным. Попытка определить абсолютный минимум функции  $\Pi_{3.o}$  от двух переменных  $N$  и  $V$  не привела к успеху, так как первые производные не равны 0. В связи с этим установление минимума функции  $\Pi_{3.o}$  производилось методом Лагранжа.

Исследование целевой функции заключается в нахождении ее экстремальных точек и выявлении их характера (максимума или минимума). Анализ целевой функции может быть выполнен различными математическими методами. Если между переменными величинами формально установлена взаимосвязь, то исследование целевой функции сводится к определению относительного экстремума. Если такой связи нет, то оптимальный вариант определяется в результате перебора и сравнения всех способов производства работ.

Допустим, что между аргументами  $N$  и  $V$  существует следующая взаимосвязь:

$$g(N, V) = 0. \quad (3)$$

Относительный экстремум целевой функции можно найти методом множителей Лагранжа, позволяющим исследовать ее несколько переменных. Для этого составляется

вспомогательная функция Лагранжа:

$$L(N, V, \lambda) = f(N, V) + \sum_{i=1}^m \lambda_i g_i(N, V), \quad (4)$$

где  $f(N, V)$  – целевая функция;  $\lambda_i$  – множитель Лагранжа для  $i$ -го уравнения связи;  $t$  – количество уравнений связи между переменными.

Затем вычисляются и приравниваются к нулю частные производные по  $N$ ,  $V$  и  $\lambda$ :

$$\frac{\partial L}{\partial N_i} = \frac{\partial f}{\partial N_i} + \sum_{i=1}^m \lambda_i \frac{\partial g_i}{\partial N_i} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial L}{\partial V_i} = \frac{\partial f}{\partial V_i} + \sum_{i=1}^m \lambda_i \frac{\partial g_i}{\partial V_i} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_i} = g_i(N, V) = 0. \quad (7)$$

Полученные уравнения объединяются в систему и решаются относительно переменных  $N$ ,  $V$ ,  $\lambda$ . Система уравнений представляет собой только необходимые условия первого порядка, поэтому  $N$  и  $V$  будут называться условно-стационарными точками. Для определения их характера в соответствии с работой [2] записывается условие, позволяющее установить экстремальные значения функции:

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 L}{\partial x_i \partial x_j}(x, \lambda) \varepsilon_i \varepsilon_j, \quad (8)$$

где  $x_1 = N$ ;  $\varepsilon_1 = \Delta N$ ;  $n = 2$ ;  $x_2 = V$ ;  $\varepsilon_2 = \Delta V$ .

Условие (4) второго порядка квадратичной формы является достаточным для определения характера относительного экстремума. Если в полученной точке целевая функция минимальна, то квадратичная форма положительна, и наоборот, если максимальна, то квадратичная форма отрицательна. При этом должно выполняться равенство

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial g_k}{\partial N_i}(N, V) \Delta N_i + \sum_{i=1}^n \frac{\partial g_k}{\partial V_i}(N, V) \Delta V_i = 0, \quad (9)$$

где  $k = 1, 2, \dots, n$ .

Рассмотрим группу рабочих органов, к которой относятся бурильные, фрезерные, баровые и другие машины, имеющие одно вращательное и поступательное переносное и относительное движение (или наоборот).

Мощность связана с параметрами процесса зависимостью

$$N = Q \cdot V + M \cdot \omega, \quad (10)$$

где  $Q$  – усилие подачи на резец;  $M$  – момент от силы резания;  $\omega$  – угловая скорость.

Раскрывая значения крутящего момента и усилия подачи через выражения удельных сил сопротивления подаче и вращению долота, получим:

$$N = M\omega + QV = BhR\omega + AhV = 2\pi BR \frac{h\omega}{2\pi} + \frac{2\pi A}{\omega} \frac{h\omega}{2\pi} V = 2\pi BRV + 2\pi \frac{A}{\omega} V^2, \quad (11)$$

где  $h$  – толщина срезаемой стружки;  $A$  – удельная сила подаче рабочего органа, зависящая от физико-механических свойств грунта и конструкции рабочего органа и определяющая величину усилия подачи, необходимого для вдавливания резца в забой на вели-

чину  $h$ ;  $B$  – удельная сила резания грунта, зависящая от физико-механических свойств грунта и определяющая величину усилия (или момента), необходимого для среза грунта толщиной  $h$ .

При преобразовании уравнения (11) мы воспользовались зависимостью, связывающей угловую скорость, толщину срезаемой стружки и скорость подачи

$$V = \frac{h\omega}{2\pi}.$$

Представим уравнение связи в виде

$$N - mV - nV^2 = 0, \quad (12)$$

где  $m = 2\pi RB$ ,  $n = 2\pi \frac{A}{\omega}$ .

Составляя вспомогательную функцию Лагранжа с введением в нее множителя Лагранжа  $\lambda$ , получим

$$L(N, V, \lambda) = a + \frac{b}{V} + \frac{cN}{V} + \lambda(N - mV - nV^2). \quad (13)$$

Определим частные производные по  $N$ ,  $V$ ,  $\lambda$  и приравняем их к нулю

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial V} = -\frac{b}{V^2} - \frac{cN}{V^2} - \lambda m - 2\lambda nV = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial N} = \frac{c}{V} + \lambda = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = N - mV - nV^2 = 0. \end{cases}$$

Решение системы трех уравнений позволило определить экстремальные значения скорости подачи рабочего органа и реализуемой мощности

$$V = \sqrt{\frac{b}{cN}} = \sqrt{\frac{b\omega}{2\pi Ac}}, \quad (14)$$

$$N = m\sqrt{\frac{b}{cN}} + \frac{b}{c} = BR\sqrt{\frac{2\pi B\omega}{Ac}} + \frac{b}{c}. \quad (15)$$

В результате решения системы уравнений получены координаты условно-стационарной точки. Характер относительного экстремума в этой точке определяем по уравнениям (8) и (9).

При существовании минимума в условно-стационарной точке должно выполняться неравенство

$$\frac{\partial^2 L}{\partial N^2}(N, V, \lambda)\Delta N^2 + \frac{2\partial^2 L}{\partial N \partial V}(N, V, \lambda)\Delta V \Delta N + \frac{\partial^2 L}{\partial V^2}(N, V, \lambda)\Delta V^2 > 0. \quad (15a)$$

Произведем анализ выражения (15a)

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 L}{\partial N^2} = \frac{2c}{V}, \\ \frac{\partial^2 L}{\partial V^2} = \frac{2b}{V^3} + \frac{2cN}{V^3} - 2\lambda n, \\ \frac{\partial^2 L}{\partial N \partial V} = \frac{2c}{V^3}. \end{cases} \quad (16)$$

Во втором уравнении системы (16), воспользовавшись подстановкой из выражения первой производной функции L по N, заменив  $\lambda$ , получим

$$\frac{\partial^2 L}{\partial V^2} = \frac{2b}{V^3} + \frac{2cN}{V^3} + \frac{2n}{cV}.$$

Таким образом, все вторые производные функции L положительны, так как в них входят экономические и физические параметры, которые по своей сути не могут быть отрицательными. По этой же причине приращения  $\Delta N$  и  $\Delta V$  положительны. Таким образом, целевая функция при аргументах N и V, определяемых из уравнений (14) и (15), будет минимальной.

При анализе функции себестоимости (2) алгоритм решения будет таким же, а минимальная целевая функция определится координатами

$$V = \sqrt{\frac{b_1 \omega}{2\pi A c_1}}, \quad (17)$$

$$N = BR \sqrt{\frac{2\pi b_1 \omega}{A c_1}} + \frac{b_1}{c_1}. \quad (18)$$

В случае класса машин, у которых траектория движения рабочего органа имеет поступательное и два вращательных движения, в уравнениях (15)-(18) необходимо учитывать абсолютную скорость подачи и абсолютную скорость вращательного движения рабочего органа

$$\bar{V} = \bar{V}_1 + \bar{V}_2, \quad \bar{\omega} = \bar{\omega}_1 + \bar{\omega}_2.$$

При транспортировании грунта винтовым рабочим органом возникают дополнительные нагрузления на забой. Это нагружение обусловлено весом грунта на транспортере и силой трения перемещаемого грунта о забой. Как установлено нами приросты усилия подачи и момента от сил сопротивления определяются по зависимостям

$$\begin{cases} Q_d = k_Q p z, \\ M_d = p z d \omega^2, \end{cases} \quad (19)$$

где  $Q_d$  – дополнительное усилие подачи;  $M_d$  – момент от сил сопротивления грунта перемещению винтовым транспортером.

Дополнительное усилие подачи не оказывает значительного влияния на режим работы [4] в связи с малостью в сравнении с весом рабочего органа. Однако дополнительный момент сравним с моментом сопротивления от сил резания грунта, который должен быть учтен при определении оптимальных значений параметров  $\Pi_{3.0}$  и С.

Выражение, определяющее мощность, в этом случае имеет вид

$$N = mV + nV^2 + M_d \omega = mV + nV + p z d \omega^3 = mV + nV^2 + lV^3, \quad (20)$$

$$\text{где } l = \frac{8pzd\pi^3}{h^3}.$$

Уравнение Лагранжа с учетом зависимости (20) будет иметь вид

$$L(N, V, \lambda) = a + \frac{b}{V} + \frac{cN}{V} + \lambda(N - mV - nV^2 - lV^3). \quad (21)$$

Первые производные определяются из выражения (21)

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial V} = -\frac{b}{V^2} - \frac{cN}{V^2} - \lambda m - 2\lambda nV - 3l\lambda V^2 = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial N} = \frac{c}{V} + \lambda = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = N - mV - nV^2 - lV^3 = 0. \end{cases} \quad (22)$$

Решение системы трех уравнений привело нас к зависимости вида

$$2lcV^3 + ncV^2 - b = 0.$$

Это кубическое уравнение не имеет целочисленного решения.

В связи с этим, воспользуемся уравнением, полученным авторами при анализе математической модели движения винтового рабочего органа [1]:

$$V = \sqrt[3]{\frac{Ng(pz - mg \cdot \ln \frac{mg + pz}{mg})}{4p^2 Cz}}, \quad (23)$$

где  $p$  – вес грунта на 1 метр длины транспортера;  $z$  – глубина проходки;  $C$  – коэффициент взаимосвязи,  $C=A/B$ ;  $t$  – масса рабочего органа.

Уравнение получено из условия минимизации удельной энергоемкости процесса.

Используя уравнение (23) для уравнения связи, мы будем оптимизировать показатели  $\Pi_{3.0}$  и  $C$  для случая минимальной энергоемкости процесса  $E_{уд}$ .

Уравнение связи имеет вид

$$N = uV^k, \quad (24)$$

где  $u$  – коэффициент, зависящий от физико-механических свойств грунта, геометрических параметров машин;  $k$  – показатель степени, характеризующий количество переменных факторов, влияющих на скорость проходки траншей  $V$  и мощность машины  $N$ , при рассматриваемом классе машин  $k=3$ ,

$$N = uV^3.$$

Следовательно, уравнение Лагранжа с учетом зависимости (24) примет вид

$$L(N, V, \lambda) = a + \frac{b}{V} + \frac{cN}{V} + \lambda(N - uV^3). \quad (25)$$

Определяются первые производные из выражения (25)

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial V} = -\frac{b}{V^2} - \frac{cN}{V^2} - 3\lambda uV^2 = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial N} = \frac{c}{V} + \lambda = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = N - uV^3 = 0. \end{cases} \quad (26)$$

Решение системы трех уравнений привело к зависимости вида

$$2ucV^3 - b = 0.$$

Решение уравнения позволяет определить скорость подачи рабочего органа:

$$V = \sqrt[3]{\frac{b}{2cu}}.$$

Анализ результатов исследований режимов работы машин и механизмов, участвующих в процессе устройства траншейных фундаментов, показывает, что формальная взаимосвязь между показателями  $N$  и  $V$  установлена для проходки траншей вращательным [2], [3] бурением. Для проходки траншей ударным бурением имеются статистические данные. Поскольку аналогичные данные не получены из обзора для проходки траншей без выемки грунта, они были установлены в ходе этих исследований.

#### Список литературы

1. Кадыров А.С. Теория и расчет фрезерных и бурильных рабочих органов землеройных машин, применяемых при строительстве способом «стены в грунте»: Дис. ... д-ра техн. наук. - М.: МИСИ им. Куйбышева, 1989. - 273 с.
2. Кадыров А.С. Установление технологических параметров буровых машин и механизмов с винтовыми рабочими органами. Механизация трудоемких процессов в строительно-дорожном производстве / А.С. Кадыров, А.А. Коркин. - Караганда, 1983. - С. 102-104.
3. Кадыров А.С. Исследование нагружения винтовых рабочих органов большого диаметра (применительно к устройству буронабивных свай): Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - М., 1979. - 22 с.
4. Кадыров А.С. Фрезерные и бурильные машины. Теория и расчет / А.С. Кадыров, Р.Р. Хайбуллин, Б.К. Курмашева. - Караганда: Изд-во ТОО «Санат-Полиграфия», 2007. - 214 с.

Получено 29.10.08

УДК 669.011

**Ш.С. Шакаримов, М.К. Кылышканов, Ю.И. Лопухов**  
ВКГТУ, г. Усть-Каменогорск

#### ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НИКЕЛЬ-ХРОМОВЫХ ПОКРЫТИЙ, НАНЕСЕННЫХ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Задача повышения эксплуатационной надежности машин приобретает все большее значение в связи с увеличением механических, тепловых и других видов воздействий на детали. Наиболее перспективными технологиями поверхностного упрочнения деталей являются методы физико-химического модифицирования, под которыми понимают целенаправленное изменение свойств поверхности в результате технологического внешнего воздействия.

Среди множества способов физико-химического модифицирования наиболее перспективным представляется плазменная обработка. Плазменное напыление является одним из наиболее интересных и эффективных способов нанесения защитных и упрочняющих покрытий на поверхность деталей. Это процесс, при котором наносимый материал в виде порошка вводится в струю плазмы и нагревается в процессе движения. При ударе и деформации происходит взаимодействие частиц с поверхностью основы или напыляемым материалом и формирование покрытия. Основным преимуществом плазменного напыления является увеличение адгезии с основным слоем при отсутствии значительного нагрева основного материала.

Исследовали порошковое покрытие на основе Ni: ПГАН-33 (Cr-22÷24 %; Mo-4 %; Si≈2 %; W≈1 %), обладающего высокой коррозионной стойкостью в различных агрессивных средах.

Покрытие наносили высокоскоростной плазмой на Сталь 3 (ГОСТ 380-98), на образец размером 50×50×3 мм. Предварительно поверхность стального образца обрабатывали мелкой чугунной дробью для создания активной шероховатой поверхности. Гранулометрические размеры частиц порошка 63- 82 мкм. Расход порошка при плазменном напылении составляет 22,5 г/мин. Расстояние от среза сопла до образцов 60 мм, скорость перемещения образцов 380 мм/мин.

Металлографические исследования, проведенные на микроскопе Axioskop-2, свидетельствуют о хорошем качестве покрытия (рис. 1).

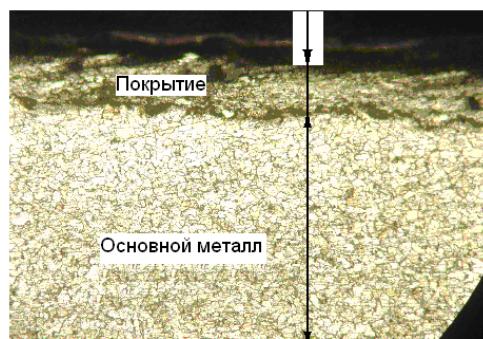


Рисунок 1 – Микроструктура поверхности ×200

Микроструктурные и элементные исследования проводились с помощью растрового электронного микроскопа JSM-6390LV. Установлено, что толщина покрытия составила 0,05 мм (рис. 2).

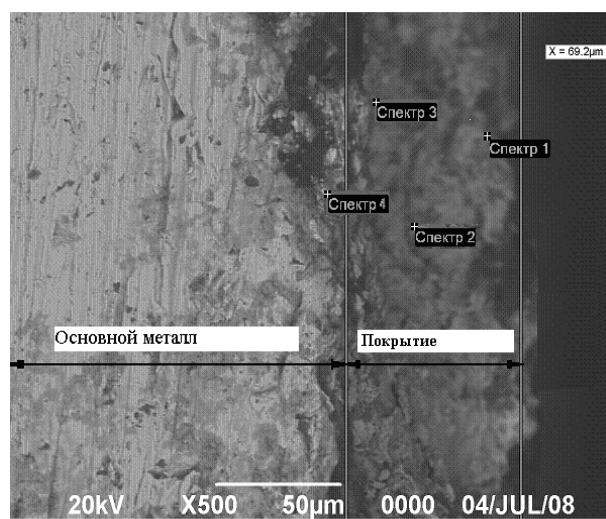


Рисунок 2 – Микроструктура поперечного шлифа, РЭМ ×500

Элементный анализ проводили в переходной зоне и непосредственно в покрытии, исследования в переходной зоне (спектр № 4, рис. 3) показывают присутствие значительного объема железа, снижение никеля на 30 %, хрома на 44 %, молибдена на 73 %, кремния на 67 % от исходного состояния, что свидетельствует о взаимной диффузии в переходном слое между покрытием и основным металлом. Это позволяет судить о высокой кинетической энергии частиц, проходящих через высокотемпературную область плазменной струи, и выделении достаточного количества тепловой энергии в зоне соударения (80-100 м/с) частиц с основным металлом, вызывающей микроприваривание последних к основе.

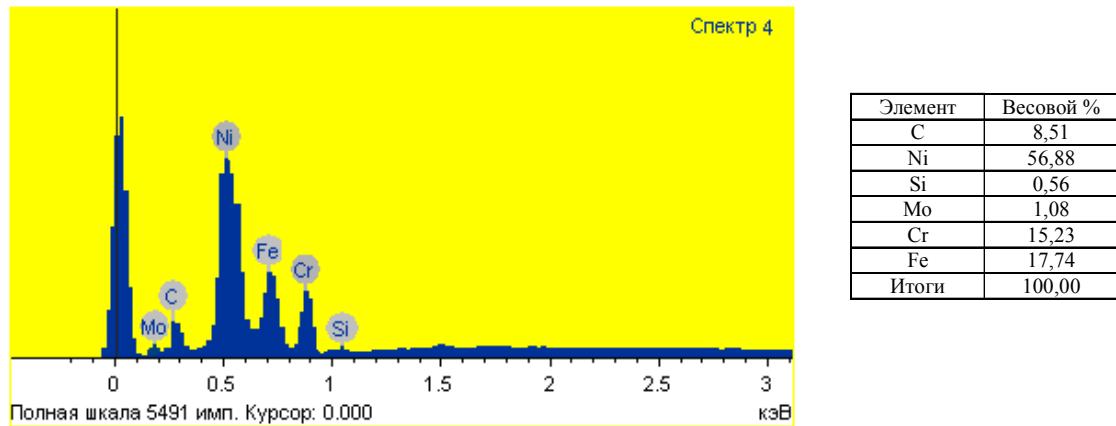
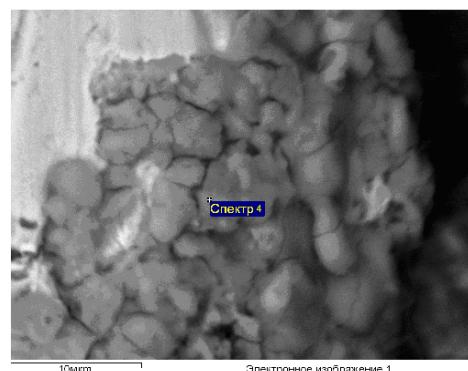
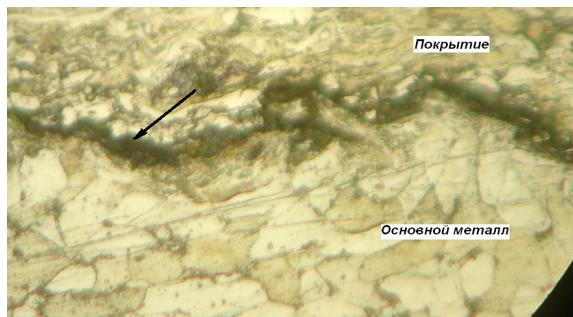


Рисунок 3 – Энергодисперсионный анализ переходной зоны

Исследование переходной зоны выявили наличие вдоль границы с основным металлом темной прослойки (рис. 4). Замеры микротвердости, проведенные вдоль границы с покрытием, показывают ее стабильное значение и составляют в среднем 4200-4640 МПа.

Это свидетельствует о том, что в тонком поверхностном слое, состоящем из зерен феррита, вследствие нагрева до температуры выше 727 °C и последующего быстрого охлаждения произошло фазовое превращение с образованием перлитной структуры. Для объяснения этих процессов предлагается в качестве варианта флуктуационный механизм, согласно которому, возможно, атомы углерода с большой диффузионной подвижностью при высоких температурах могут создавать зоны с повышенной концентрацией углерода. Стабильное значение микротвердости свидетельствует о хорошей плотности покрытия в переходной зоне (рис. 5), что в целом повышает коррозионную стойкость данного покрытия.



Вследствие высокой скорости нагрева основного металла диффузионные процессы перестройки решетки объемно-центрированного куба феррита в решетку гранецентрированного куба аустенита могут не заканчиваться на линии GS диаграммы Fe-Fe<sub>3</sub>C и может происходить сдвиг точки Ac<sub>3</sub> в область более высоких температур.

Последующие исследования по толщине покрытия (спектр № 3, №2, №1 рис. 6, 7, 8) показывают, что диффузионные процессы относительно переходной зоны ослабевают и, начиная с толщины покрытия 15 мкм, образуется требуемый элементный состав исходного порошка.

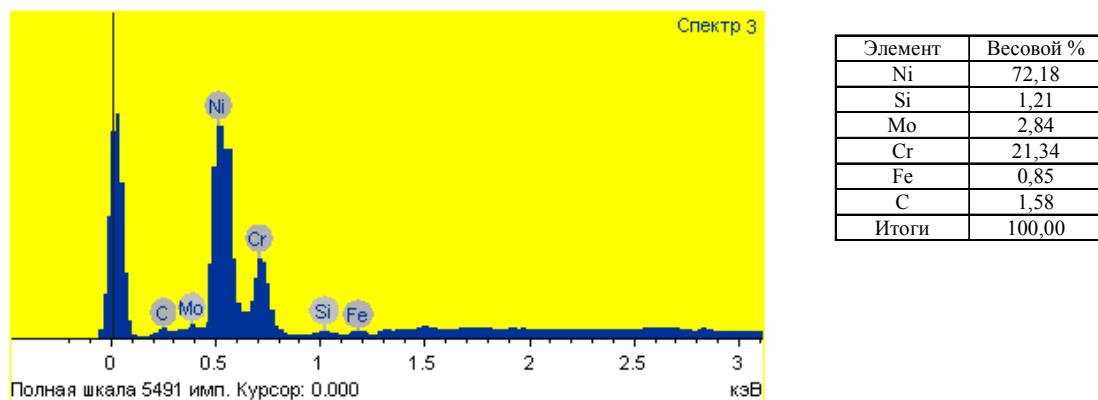


Рисунок 6 – Энергодисперсионный анализ покрытия

Покрытие наносится при быстром охлаждении до низких температур, при которых диффузионные процессы становятся невозможными. Процесс носит бездиффузионный характер, т.е. закономерное кооперативно направленное смещение атомов в процессе перестройки решетки (не разрушая межатомных связей). Вследствие чего в последующих глубинных слоях основного металла происходят бездиффузионные процессы, что приводить к упрочнению основного металла вдоль границы.

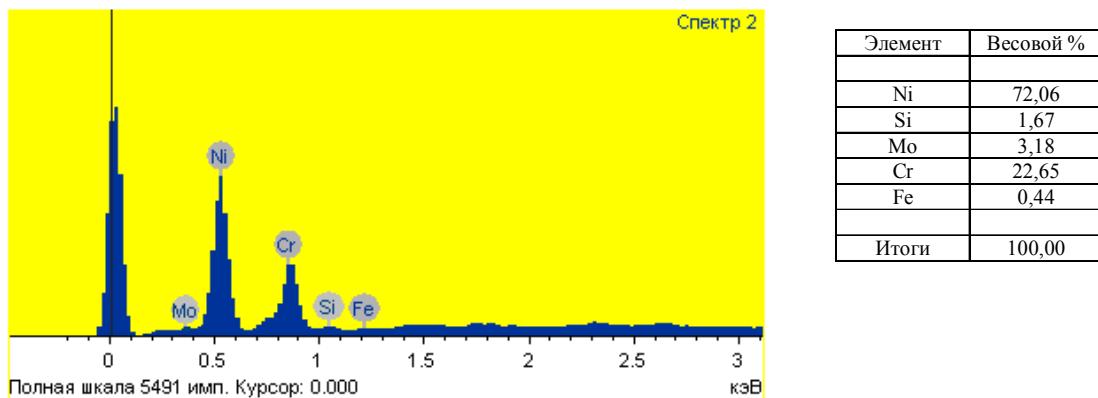


Рисунок 7 – Энергодисперсионный анализ покрытия

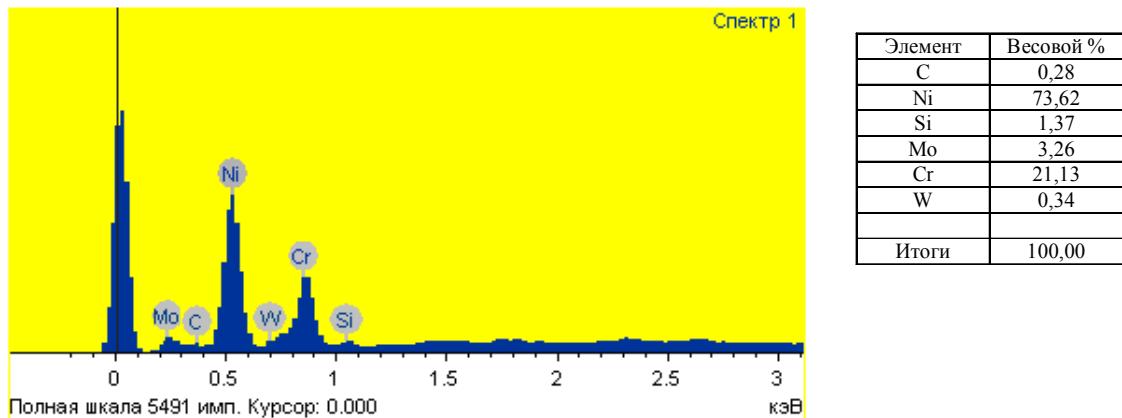


Рисунок 8 – Энергодисперсионный анализ покрытия

Одновременно нам удалось обнаружить повышенное содержание углерода в покрытии относительно основного металла в спектрах № 3-1,58 %, № 4-8,51 %. По-видимому, различное содержание углерода и его отсутствие (спектр № 2) позволяет судить пока об аномальных образованиях, которые подлежат дальнейшему исследованию.

Список литературы

1. Гриценко В.В. Физическая инженерия поверхности / В.В. Гриценко, Н.А. Погребняк, М.К. Кыльшканов и др. – Харьков, 2005. – Т. 3. – № 3-4. – С.190-198.
2. Погребняк А.Д. Физическая инженерия поверхности / А.Д. Погребняк, Д.Л. Алонцева, М.К. Кыльшканов и др. – Харьков, 2007. – Т. 5. – № 1-2. – С.34-49.

Получено 12.11.08

ЧИСТКА ЛАЗЕРОМ

по страницам



Немецкие инженеры предлагают очищать поверхность металлических деталей лучом лазера, который выжигает загрязнения. Луч проводится по поверхности детали быстро вращающимся зеркалом, так что металл не успевает нагреться, а грязь сгорает. Новинка будет применяться, прежде всего, в автомобилестроении. Детали для сборки автомобилей часто привозят от смежников из других стран, даже с других континентов, а для защиты в пути от коррозии их покрывают специальными составами, которые затем приходится отмывать химическими растворителями. Лазерный метод и чище и дешевле.

«Наука и жизнь» № 7, 2008