



УДК 539.3/.6:519.863:629.735.064

**Б.М. Абдеев, Г.А. Гурьянов, Е.А. Клименко**

Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева,  
г. Усть-Каменогорск

**ВАЛ РОТОРА ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ МИНИМАЛЬНОЙ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МАТЕРИАЛОЕМКОСТИ  
С НОРМИРОВАННЫМ ЗАПАСОМ ПРОЧНОСТИ**

Требования к современным конструкциям технологических машин и механизмов многообразны. С одной стороны, необходимо обеспечить их достаточную несущую способность и надежность, а с другой – добиться наилучшего функционального предназначения и максимального снижения расхода материала [1].

Концептуально-методической основой для решения поставленной экстремальной задачи являются результаты, изложенные в авторских публикациях [2 – 5].

В данной работе идеализированная механико-математическая модель [2, 5] модифицирована и адаптирована к определению стационарных (оптимальных) численных значений

$$X_0 = \frac{d_{0\theta}}{d}, \quad X_{0n} = \frac{d_{0n}}{d_n}, \quad Y_{0n} = \frac{b_{0n}}{l_2} \quad (1)$$

$$(0 < X_0 < 1, \quad X_0 \leq X_{0n} < 1, \quad 0 < Y_{0n} < 1)$$

безразмерных переменных

$$X = \frac{d_\theta}{d}, \quad X_n = \frac{d_n}{d_n}, \quad Y_n = \frac{b_n}{l_2} \quad (2)$$

$$(0 < X < 1, \quad X_0 \leq X_n \leq 1, \quad 0 \leq Y_n < 1),$$

минимизирующих объём

$$V_{\min} = V(X_0, X_{0n}, Y_{0n}) \quad (3)$$

целевой функции [5–7]

$$V = V(X, X_n, Y_n) \quad (4)$$

конкретного вала длиной  $L_k = 312,5$  мм при реализации уравнений связи и граничных неравенств, в виде условий прочности

$$\sigma_{IV}^{(A)} = [\sigma], \quad (5)$$

$$\sigma_{IV}^{(H)} \leq [\sigma] \quad (6)$$

и равного сопротивления

$$\sigma_{IV}^{(C)} = \sigma_{IV}^{(D)} \leq [\sigma] \quad (7)$$

по допускаемым нормальным  $[\sigma]$  и эквивалентным  $\sigma_{IV}^{(A)}, \sigma_{IV}^{(C)}, \sigma_{IV}^{(D)}, \sigma_{IV}^{(H)}$  напряжениям энергетической гипотезы Губера-Генки-Мизеса [2, 8, 9], действующим в характерных сечениях «А», «С», «Д», «Н» моделируемой системы (рис. 1), предназначенной для механической активации вяжущих при приготовлении бетона.

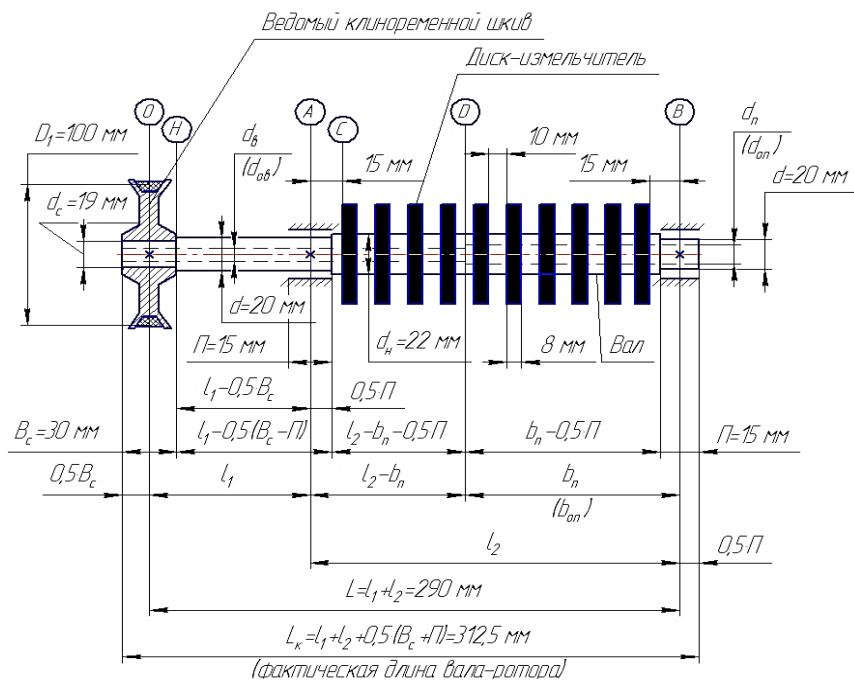


Рисунок 1 – Расчётно-конструктивная схематизация вала

При математическом описании конструкции вводим общепринятые допущения [5, 10, 11]: а) об однородности, изотропности и линейной упругости материала; б) о пренебрежении влиянием собственного веса роторного комплекса «вал – насадки» и внутренними поперечными силами.

С целью большей наглядности и лучшей интерпретации дальнейших теоретических выкладок на рис. 2 изображены планы сил ротора и клиноременной передачи [8, 10] для ведомого шкива с эпюрами изгибающего  $M$  и крутящего  $M_k$  моментов.

На консольный участок ОА вала в сечении «О» действуют расчётные нагрузки, представляющие собой внешний крутящий момент  $M_{кв}$  и сосредоточенное давление  $P$  (рис. 2) [8, 10]:

$$M_{кв} = 974000 \cdot \frac{W_d}{n_p} \cdot \eta = 974000 \cdot \frac{7}{5000} \cdot 0,95 = 1295,4 \text{ кГ}\cdot\text{мм}; \quad (8)$$

$$P = 3 \cdot \sigma_0 \cdot F_p \cdot \sin \frac{\alpha}{2} = 3 \cdot 0,15 \cdot 142,96 \cdot \sin 85^\circ = 64,1 \text{ кГ}, \quad (9)$$

где  $W_d = 7$  кВт – заданная мощность на валу двигателя;  $n_p = 5000$  об/мин – частота вращения ротора;  $\eta = 0,95$  – КПД участка кинематической цепи от двигателя до вала [10];  $\sigma_0 = 0,15 \text{ кГ}/\text{мм}^2$  – наибольшее начальное рабочее натяжение для клиноременных передач ( $\sigma_0 = 0,12 \dots 0,15 \text{ кГ}/\text{мм}^2$ );  $\alpha$  – угол обхвата ведомого шкива, град,

$$\alpha = 180^\circ - \frac{D_2 - D_1}{\ell} \cdot 60^\circ = 180^\circ - \frac{200 - 100}{600} \cdot 60^\circ = 170^\circ; \quad (10)$$

$D_2 = 200$  мм,  $D_1 = 100$  мм – соответственно, диаметры ведущего и ведомого шкивов ( $D_2 \geq D_1$ );  $\ell$  – межосевое расстояние для обычной открытой передачи, аппроксимируемое эмпирической формулой [10]

$\ell \geq 2 \cdot (D_1 + D_2) = 2 \cdot (100 + 200) = 600 \text{ мм};$  (11)  
 $F_p = 142,96 \text{ мм}^2$  – площадь трапецидального профиля ремня, зависящая от типа сечения и определяемая по данным [8, 10] в соответствии с рис. 3.

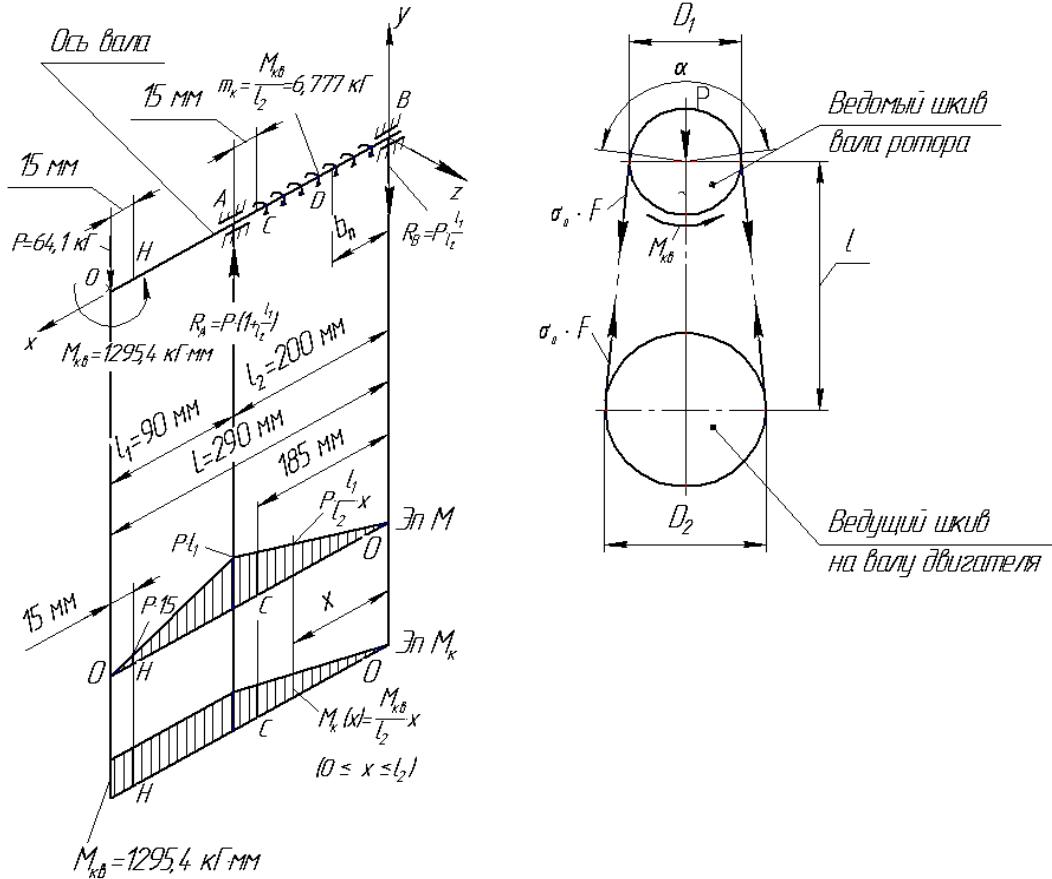
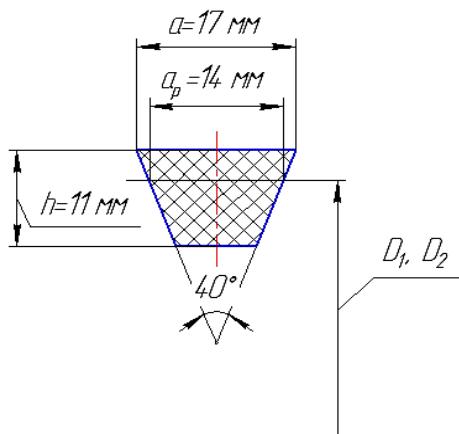


Рисунок 2 – Пространственная расчётная модель вала с опорными реакциями  $R_A, R_B$  и силовой план ременной передачи



$a_p = 14 \text{ мм}$  – расчётный размер, приближенно соответствующий ширине ремня по нейтральной линии [10]

Рисунок 3 – Стандартная форма сечения клинового ремня [10]

Силовой параметр  $M_{\text{кв}}$  уравновешивается равномерно распределенным реактивным крутящим моментом с интенсивностью [12]

$$m_k = \frac{M_{\text{кв}}}{\ell_2} = \frac{1295,4}{200} = 6,477 \frac{\kappa\Gamma \cdot \text{мм}}{\text{мм}} (\kappa\Gamma), \quad (12)$$

который действует на межпорной части вала АВ (рис. 2) и считается постоянным ввиду относительно большого количества дисков-измельчителей (10 шт) при их равномерной установке на малой длине  $\ell_2 = 200$  мм бруса (рис. 1). Следствием этой особенности является замена многоступенчатой эпюры  $M_k$  на линейную функцию (рис. 2)

$$M_k = M_k(x) = m_k \cdot x = 6,477 \cdot x (\kappa\Gamma \cdot \text{мм}), \quad 0 \leq x \leq \ell_2 = 200 \text{ мм}, \quad (13)$$

изменяющуюся по закону треугольника.

Руководствуясь методикой [5, 8, 10], включаем в данную расчётно-теоретическую модель, в дополнение к вышеуказанным допущениям а) и б), предпосылку об упрощенном расчете вала на прочность из граничных условий-равенств (5), (7) (классическая оптимизация [2-5]), не учитывая динамический характер нагрузки и, как следствие, – «усталость» материала, т.е. не вводя в соответствующие формулы коэффициенты концентрации напряжений в местах наличия галтелей и шпоночных пазов, а также характеристики циклов нагружения и т.п. Эти факторы учитываем приближенно, соответствующим выбором пониженного допускаемого напряжения [8, 11, 13]

$$[\sigma] = \frac{\sigma_m}{[n_m]}, \quad (14)$$

где  $\sigma_t$  – предел текучести стали;  $[n_t]$  – минимально допустимый (нормативный) запас прочности с учетом рекомендаций [8, 13]:

$$n_m \geq [n_m] = 2,5 \dots 3,5; \quad (15)$$

$n_t$  – расчетное значение коэффициента запаса [8]

$$n_m = \frac{\sigma_m}{\sigma_{IV}^{(C)}} = \frac{\sigma_m}{\sigma_{IV}^{(D)}}, \quad (16)$$

которое определяется равенством (7).

С конструктивно-технологической точки зрения моделируемая система содержит ряд особенностей (поясняющих) и некоторые буквенные обозначения (рис. 1, 4):

- по всей длине  $L_k$  вал является полым, что существенно снижает его вес и повышает жесткость при неизменной прочности [8, 10];
- внутренний диаметр  $d_b = \text{const}$  у консольной части ротора, а на межпорном участке АВ вала, в целях уменьшения материоемкости, предусматривается круговая проточка диаметром (см. (2))

$$d_n = X_n \cdot d_h = \text{const} > d_e = X \cdot d \quad (17)$$

на глубину

$$b_n = Y_n \cdot \ell_2 < \ell_2; \quad (18)$$

- для установки подшипников в сечениях «А», «В» и шкива (сечение «О») внешняя поверхность ротора-вала имеет ступенчатые переходы от заданного диаметра

$$d = \text{const} = 20 \text{ мм} \quad (19)$$

до известных проектных размеров

$$d_h = 22 \text{ мм}, \quad d_c = 19 \text{ мм}; \quad (20)$$

- диски-измельчители и ступица шкива фиксируются двумя [8] призматическими шпонками (рис. 4) квадратного профиля  $2 \times 2$  мм с площадью сечения

$$F_w = h_w^2 = 2^2 = 4 \text{ мм}^2 \quad (21)$$

и глубиной проточек-канавок

$$t_n = 0,5 \cdot h_w = 1 \text{ мм}; \quad (22)$$

• монтаж двух, диаметрально расположенных шпонок имеет, по сравнению с односторонним соединением, следующие преимущества: 1) обеспечивается лучшее центрование деталей; 2) практически исключается дисбаланс при вращении вала с насадками; 3) поперечные размеры шпонки сокращаются в 2 раза, а площадь её сечения – в 4 раза и, как следствие, – экономия высококачественной чистотянутой стали с пределом прочности  $\sigma_b \geq 60 \text{ кГ/мм}^2$  [8], достигающая 400 %, с одновременным уменьшением ослабления вала шпоночными пазами;

- вал–ротор опирается на два радиальных сферических двухрядных шарикоподшипника 1307 по ГОСТ 5720 – 75 [10] шириной (рис. 1)

$$\Pi = 15 \text{ мм}. \quad (23)$$

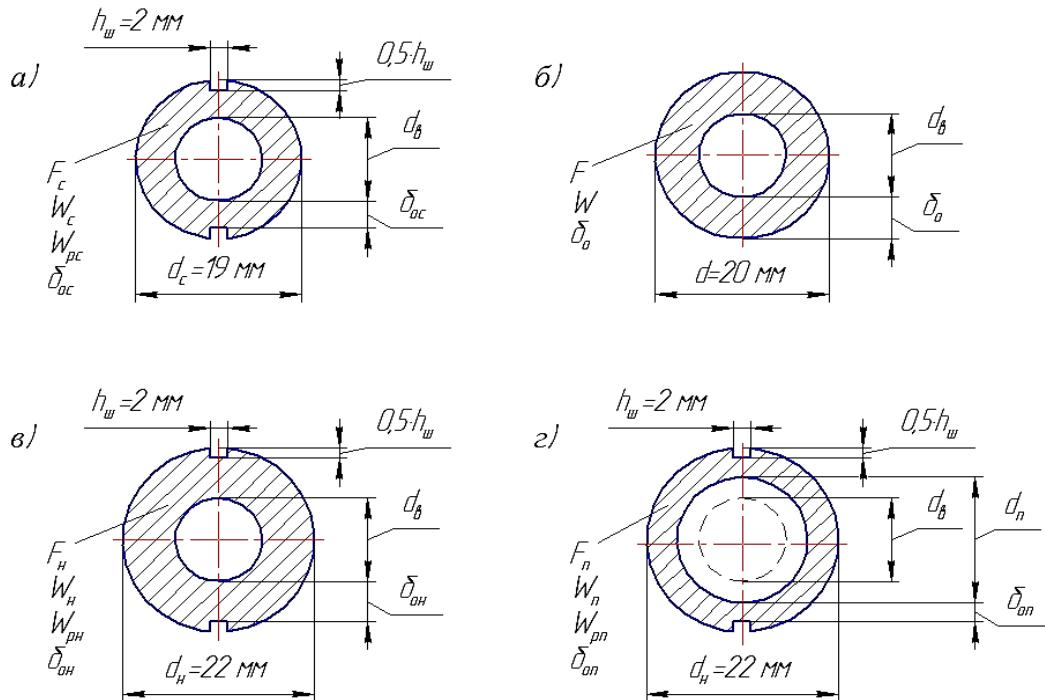


Рисунок 4 – Поперечные профили вала (см. рис. 1): а) – в сечении «Н»; б) – в опорном сечении «А»; в) – на участке длиной  $\ell_2 - b_n - 0,5 \cdot \Pi = \ell_2 \cdot (1 - Y_n - 0,5 \cdot \frac{\Pi}{\ell_2})$ ; г) – в ослабленном сечении «Д» (конец проточки)

Для решения поставленной задачи определяем необходимые геометрические характеристики в соответствии с рис. 4 и справочными формулами [8, 9]. В состав этих парамет-

ров входят:

а) площади сечений вала ( $\text{мм}^2$ )

$$\left. \begin{aligned} F_c &= \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} \cdot \left(1 - \frac{d_e^2}{d_c^2} - \frac{4 \cdot h_{ue}^2}{\pi \cdot d_c^2}\right) = \pi \cdot 90,25 \cdot (0,9855 - \frac{d_e^2}{d_c^2}), \\ F &= \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot (1 - X) = \pi \cdot 100 \cdot (1 - X), \\ F_h &= \frac{\pi \cdot d_h^2}{4} \cdot \left(1 - \frac{d_e^2}{d_h^2} - \frac{4 \cdot h_{ue}^2}{\pi \cdot d_h^2}\right) = \pi \cdot 121 \cdot (0,9895 - \frac{d_e^2}{d_h^2}), \\ F_n &= \frac{\pi \cdot d_h^2}{4} \cdot \left(1 - X_n^2 - \frac{4 \cdot h_{ue}^2}{\pi \cdot d_h^2}\right) = \pi \cdot 121 \cdot (0,9895 - X_n); \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

б) осевые  $W$ ,  $W_c$ ,  $W_h$ ,  $W_n$  и полярные  $W_{pc}$ ,  $W_{ph}$ ,  $W_{pn}$  моменты сопротивления ( $\text{мм}^3$ )

$$\left. \begin{aligned} W &= \frac{\pi \cdot d^3}{32} \cdot (1 - X^4), \\ W_c &= \frac{\pi \cdot d_c^3}{32} \cdot \left[1 - \frac{d_e^4}{d_c^4} - \frac{16 \cdot h_{ue}^2}{\pi \cdot d_c^2} \cdot (1 - 0,5 \cdot \frac{h_{ue}}{d_c})^2\right] = 673,04 \cdot (0,9493 - \frac{d_e^4}{d_c^4}), \\ W_{pc} &= \frac{\pi \cdot d_c^3}{16} \cdot \left[1 - \frac{d_e^4}{d_c^4} - \frac{8 \cdot h_{ue}^2}{\pi \cdot d_c^2} \cdot (1 - 0,5 \cdot \frac{h_{ue}}{d_c})^2\right] = 1346,08 \cdot (0,9747 - \frac{d_e^4}{d_c^4}), \\ W_h &= \frac{\pi \cdot d_h^3}{32} \cdot \left[1 - \frac{d_e^4}{d_h^4} - \frac{16 \cdot h_{ue}^2}{\pi \cdot d_h^2} \cdot (1 - 0,5 \cdot \frac{h_{ue}}{d_h})^2\right] = 1044,835 \cdot (0,9616 - \frac{d_e^4}{d_h^4}), \\ W_{ph} &= \frac{\pi \cdot d_h^3}{16} \cdot \left[1 - \frac{d_e^4}{d_h^4} - \frac{8 \cdot h_{ue}^2}{\pi \cdot d_h^2} \cdot (1 - 0,5 \cdot \frac{h_{ue}}{d_h})^2\right] = 2089,67 \cdot (0,9809 - \frac{d_e^4}{d_h^4}), \\ W_n &= \frac{\pi \cdot d_h^3}{32} \cdot \left[1 - X_n^4 - \frac{16 \cdot h_{ue}^2}{\pi \cdot d_h^2} \cdot (1 - 0,5 \cdot \frac{h_{ue}}{d_h})^2\right] = 1044,835 \cdot (0,9616 - X_n^4), \\ W_{pn} &= \frac{\pi \cdot d_h^3}{16} \cdot \left[1 - X_n^4 - \frac{8 \cdot h_{ue}^2}{\pi \cdot d_h^2} \cdot (1 - 0,5 \cdot \frac{h_{ue}}{d_h})^2\right] = 2089,67 \cdot (0,9809 - X_n^4); \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

в) размеры  $\delta_{oc}$ ,  $\delta_o$ ,  $\delta_{on}$ ,  $\delta_{op}$  толщины стенки оптимизированной трубы (мм)

$$\left. \begin{aligned} \delta_{oc} &= \frac{d_c}{2} \cdot \left[1 - \frac{d_{oe}}{d_c} \cdot \left(1 + \frac{h_{ue}}{d_{oe}}\right)\right], \delta_o = \frac{d}{2} \cdot (1 - X_o), \\ \delta_{on} &= \frac{d_h}{2} \cdot \left[1 - \frac{d_{oe}}{d_h} \cdot \left(1 + \frac{h_{ue}}{d_{oe}}\right)\right], \delta_{op} = \frac{d_h}{2} \cdot \left[1 - X_{on} \cdot \left(1 + \frac{h_{ue}}{d_{on}}\right)\right]. \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Продолжая математическое описание процесса оптимизации, находим наибольший приведенный момент  $\tilde{M}_{IV}^{(A)}$ , возникающий в сечении «A» расчётной схемы детали (рис. 2), учитывая (8), (9) и справочную информацию [8, 9]:

$$\begin{aligned} M_{IV}^{(A)} &\equiv M_{IV}^{(\max)} = \sqrt{(P \cdot \ell_1)^2 + 0,75 \cdot M_{\kappa\kappa}^2} = \\ &= \sqrt{(90 \cdot 64,1)^2 + 0,75 \cdot (1295,4)^2} = 5877 \text{ кГ} \cdot \text{мм}. \end{aligned} \quad (27)$$

Базируясь на условии предельной несущей способности (5), формулируем первое уравнение связи, принимая во внимание (14), (15), (19), (25), (27) и [2, 4]:

$$\sigma_{IV}^{(A)} = \frac{M_{IV}^{(\max)}}{W} = \frac{32 \cdot M_{IV}^{(\max)}}{\pi \cdot d^3 \cdot (1 - X_o^4)} = [\sigma] = \frac{\sigma_m}{[n_m]}, \quad (28)$$

откуда, при  $d = 20$  мм,  $[n_r] = [n_r]_{\max} = 3,5$  и  $\sigma_r = 28$  кГ/мм<sup>2</sup> – для углеродистой стали марки 45 [8], вычисляем оптимальное значение  $X_o$  переменного геометрического параметра  $X$  (см. (1) и (2))

$$X_o = \sqrt[4]{1 - \frac{32 \cdot M_{IV}^{(\max)} \cdot [n_m]}{\pi \cdot d^3 \cdot \sigma_m}} = \sqrt[4]{1 - \frac{32 \cdot 5877 \cdot 3,5}{3,14 \cdot (20)^3 \cdot 28}} = 0,5033 \approx 0,5 \quad (29)$$

и соответствующий внутренний диаметр  $d_{ob}$

$$d_{ob} = X_o \cdot d = 0,5 \cdot 20 = 10 \text{ мм}, \quad (30)$$

на основании соотношений (1).

Определяем изгибающие  $M_c$ ,  $M_D$ ,  $M_h$  и крутящие  $M_{kc}$ ,  $M_{kd}$ ,  $M_{kh}$  моменты, оценивая запас прочности вала в сечениях «C», «H» при уже известных характеристиках  $d_b=d_{ob}=10$  мм,  $X=X_o=0,5$  (см. (29)–(30)) с использованием: численных данных (8), (9), (15), (20); формул (2), (7), (25); (рис. 1, 2) при  $x=185$  мм и нормативных положений [8], касающихся проектирования валов:

$$\left. \begin{aligned} M_c &= P \cdot \frac{\ell_1}{\ell_2} \cdot 185 = 64,1 \cdot \frac{90}{200} \cdot 185 = 5336,3 \text{ кГ} \cdot \text{мм}, \\ M_{kc} &= M_{kc} \cdot \frac{185}{\ell_2} = 1295,4 \cdot \frac{185}{200} = 1198,245 \text{ кГ} \cdot \text{мм}; \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

$$\left. \begin{aligned} M_D &= P \cdot \ell_1 \cdot \frac{b_n}{\ell_2} = 64,1 \cdot 90 \cdot Y_n = 5769 \cdot Y_n (\text{кГ} \cdot \text{мм}), \\ M_{kd} &= M_{kd} \cdot \frac{b_n}{\ell_2} = 1295,4 \cdot Y_n (\text{кГ} \cdot \text{мм}); \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

$$\left. \begin{aligned} M_h &= P \cdot 15 = 64,1 \cdot 15 = 961,5 \text{ кГ} \cdot \text{мм}, \\ M_{kh} &= M_{kh} = 1295,4 \text{ кГ} \cdot \text{мм}; \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{IV}^{(C)} &= \sqrt{\left(\frac{M_c}{W_u}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{M_{kc}}{W_{pu}}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left[\frac{5336,3}{1044,835 \cdot (0,9616 - \frac{10^4}{22^4})}\right]^2 + 3 \cdot \left[\frac{1198,245}{2089,67 \cdot (0,9809 - \frac{10^4}{22^4})}\right]^2} = \\ &= 5,66 \frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2} < \frac{\sigma_m}{[n_m]} = \frac{28}{3,5} = 8 \frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}; \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_{IV}^{(n)} &= \sqrt{\left(\frac{M_n}{W_c}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{M_{kn}}{W_{pc}}\right)^2} = \\
 &= \sqrt{\left[\frac{961,5}{673,04 \cdot (0,9493 - \frac{10^4}{19^4})}\right]^2 + 3 \cdot \left[\frac{1295,4}{1346,08 \cdot (0,9747 - \frac{10^4}{19^4})}\right]^2} = \\
 &= 2,48 \frac{\kappa\Gamma}{\text{мм}^2} < [\sigma] = 8 \frac{\kappa\Gamma}{\text{мм}^2}.
 \end{aligned} \tag{35}$$

Представляем в развернутом виде целевой функциональный критерий (4) при  $X=X_o=\text{const}$ ,  $d_b=d_{ob}=\text{const}$ ,  $d_n=d_{on}=\text{const}$ , воспользовавшись обозначениями (2), соотношениями (24), результатами расчета (29)-(30) и рис. 1:

$$\begin{aligned}
 V &= V(X_n, Y_n) = V_{o1} + V_{o2} + V_3 + V_{o4} = F_{oc} \cdot B_c + F_o \cdot [\ell_1 - 0,5 \cdot (B_c - \Pi)] + \\
 &+ \frac{\pi \cdot d_n^2}{4} \cdot [(0,9895 - \frac{10^2}{22^2}) \cdot (\ell_2 - b_n - 0,5 \cdot \Pi) + (0,9895 - X_n^2) \cdot (b_n - 0,5 \cdot \Pi)] + \\
 &+ \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot (1 - \frac{d_{on}^2}{d^2}) \cdot \Pi, \Rightarrow \\
 V &= 6024 + 19428,75 + \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot (1 - \frac{d_{on}^2}{d^2}) \cdot \Pi + \\
 &+ \frac{\pi \cdot d_n^2 \cdot \ell_2}{4} \cdot [0,7829 \cdot (0,9625 - Y_n) + (0,9895 - X_n^2) \cdot (Y_n - 0,0375)], \quad \left. \right\} \tag{36}
 \end{aligned}$$

где  $V_{o1}$ ,  $V_{o2}$ ,  $V_{o4} = \text{const}$  – стационарные объемы частей вала

$$V_{o1} = 6024 \text{ мм}^3, V_{o2} = 19428,75 \text{ мм}^3, \tag{37}$$

$$V_{o4} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot (1 - \frac{d_{on}^2}{d^2}) \cdot \Pi \tag{38}$$

длиной, соответственно,  $B_c$ ,  $\ell_1$  -  $0,5 \cdot (B_c - \Pi)$  и  $\Pi$ .

Упрощаем алгоритм дальнейшей оптимизации по аналогии с разработанной методикой [2, 4], обращая внимание на большой запас прочности (34), равный 29 %, и на тот факт, что в соответствии с (22) и (24), суммарная площадь поперечного профиля двух шпоночных проточек (рис. 4)

$$2 \cdot t_n \cdot h_w = h_w^2 = 4 \text{ мм}^2 \ll F_c, F, F_n, F_{in}. \tag{39}$$

В этой связи за основу принимаем идеализированную расчетную схему круглого полого ступенчатого бруса (рис. 5) без учета влияния шпоночных канавок на напряженное состояние сечений «C» и «D», что равносильно  $h_w = 0$  в четырех последних формулах зависимостей (25), которые преобразуются к известному классическому виду [8, 9]

$$W_h^* = 0,5 \cdot W_{pn}^* = \frac{\pi \cdot d_n^3}{32} \cdot (1 - \frac{d_{on}^4}{d_n^4}) = \frac{\pi \cdot d_n^3}{32} \cdot 0,9573, \tag{40}$$

$$W_n^* = 0,5 \cdot W_{pn}^* = \frac{\pi \cdot d_n^3}{32} \cdot (1 - X_n^4). \tag{41}$$

В результате второе уравнение связи или условие равнопрочности (7) записывается следующим образом, учитывая (27), (31), (32), (40), (41) и обозначения (2), касающиеся

переменной  $Y_n$ :

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{IV}^{(D)} = \sigma_{IV}^{(C)}, & \Rightarrow \frac{\sqrt{M_D^2 + 0,75 \cdot M_{KD}^2}}{W_n^*} = \frac{\sqrt{M_C^2 + 0,75 \cdot M_{KC}^2}}{W_n^*}, \Rightarrow \\ \frac{32 \cdot Y_n \cdot \sqrt{(5769)^2 + 0,75 \cdot (1295,4)^2}}{\pi \cdot d_n^3 \cdot (1 - X_n^4)} &= \frac{32 \cdot \sqrt{(5336,3)^2 + 0,75 \cdot (1198,245)^2}}{\pi \cdot d_n^3 \cdot 0,9573}; \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

откуда

$$Y_n = 0,9663 \cdot (1 - X_n^4). \quad (43)$$

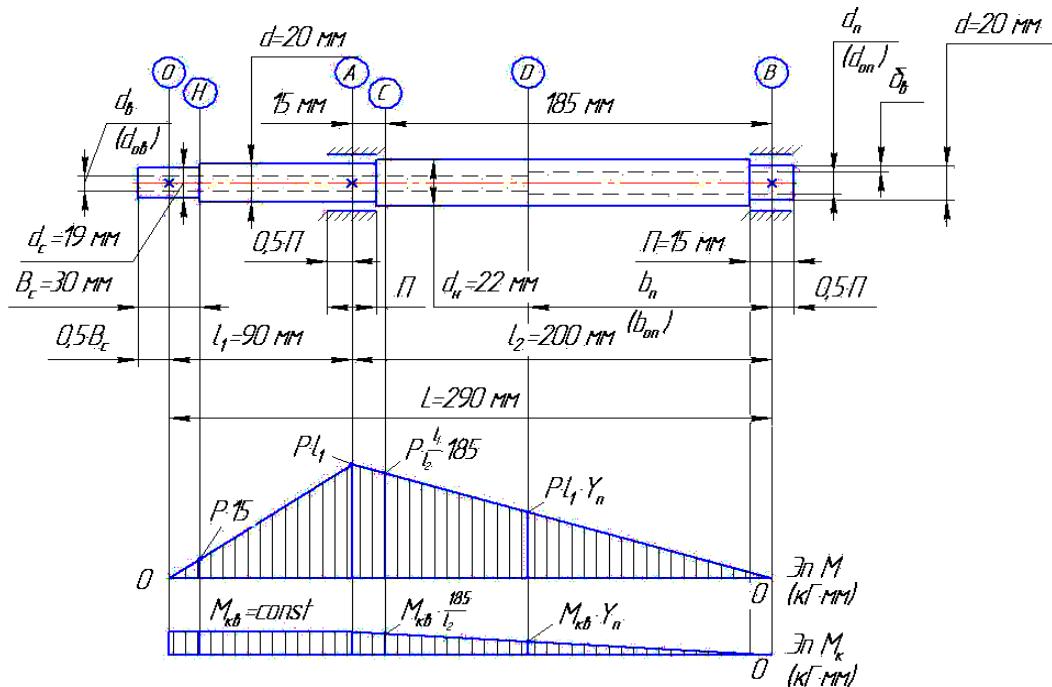


Рисунок 5 – Идеализированная модель ротора–вала

Подставляя (43) в (36), получаем целевую функцию с одной переменной  $X_n$ :

$$\begin{aligned} V = V(X_n) = 25452,75 + \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot (1 - \frac{d_{on}^2}{d^2}) \cdot \Pi + \\ + \frac{\pi \cdot d_n^2 \cdot l_2}{4} \cdot (0,9663 \cdot X_n^6 - 0,1997 \cdot X_n^4 - 0,9288 \cdot X_n^2 + 0,91612), \end{aligned} \quad (44)$$

$$0,5 = X_o \leq X_n \leq 1. \quad (45)$$

Из необходимого условия [2, 4, 6, 14]

$$[\frac{dV}{dX_n}]_{X_n=X_{on}} = 0 \quad (46)$$

следует, при  $X_{on} > X_o = 0,5$ , биквадратное уравнение [14]

$$X_{on}^4 - 0,1378 \cdot X_{on}^2 - 0,3204 = 0, \quad (47)$$

имеющее один действительный положительный корень

$$X_{on} = 0,7994 \approx 0,8, \quad (48)$$

подстановка которого в формулу (44) даёт искомый наименьший объем  $V_{min}$  материала вала

$$V_{min} = V(X_{on}) = 63993 \text{ мм}^3, \quad (49)$$

что наглядно проиллюстрировано графическим отображением целевой функциональной зависимости (44) в границах (45) (см. табл., рис. 6), где  $d=20$  мм,  $d_h=22$  мм,  $\ell_2=200$  мм,  $\Pi=15$  мм, а соответствующие оптимальные геометрические параметры  $d_{on}$ ,  $V_{o4}$ ,  $Y_{on}$ ,  $b_{on}$ , согласно (1), (38), (43), (48) и рис. 5, имеют следующие значения:

$$d_{on} = X_{on} \cdot d_h = 0,8 \cdot 22 = 17,6 \text{ мм}; \quad (50)$$

$$V_{o4} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \left(1 - \frac{d_{on}^2}{d^2}\right) \cdot \Pi = \frac{3,14 \cdot 20^2}{4} \cdot \left(1 - \frac{(17,6)^2}{20^2}\right) \cdot 15 = 1062,6 \text{ мм}^3; \quad (51)$$

$$Y_{on} = 0,9663 \cdot (1 - X_{on}^4) = 0,9663 \cdot (1 - (0,8)^4) = 0,5705; \quad (52)$$

$$b_{on} = Y_{on} \cdot \ell_2 = 0,5705 \cdot 200 \approx 114,1 \text{ мм}. \quad (53)$$

#### Численная информация о функции (44)

$X_n$	$X_o = 0,5$	0,6	0,7	$X_{on} = 0,8$	0,9	1,0
$V \cdot 10^{-3}, \text{ мм}^3$	<b>78,681</b>	71,977	66,173	<b>63,993</b>	68,028	<b>83,803</b>

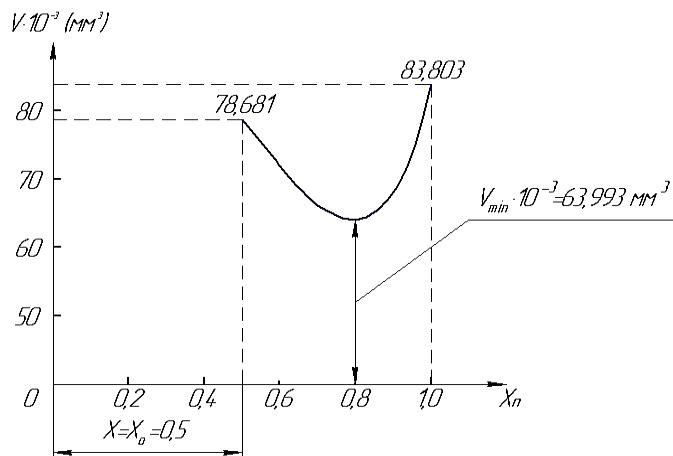


Рисунок 6 – График функции (44)

Завершая данную проектно-исследовательскую разработку, приводим некоторые дополнительные контрольно-проверочные расчёты, имеющие большое значение с технологической и эксплуатационной точек зрения, касающихся изготовления и надёжности конструкции оптимизированного вала. Прежде всего, определяем линейные размеры  $\delta_{oc}$ ,  $\delta_o$ ,  $\delta_{on}$ ,  $\delta_{on}$  и  $\delta_e$ , характеризующие толщину стенки несущей трубы ротора–вала на различных участках, руководствуясь формулами (26) и рис. 4, 5:

$$\left. \begin{aligned} \delta_{oc} &= \frac{19}{2} \cdot [1 - \frac{10}{19} \cdot (1 + \frac{2}{10})] = 3,5 \text{ мм}; \\ \delta_o &= \frac{20}{2} \cdot (1 - 0,5) = 5 \text{ мм}; \\ \delta_{on} &= \frac{22}{2} \cdot [1 - \frac{10}{22} \cdot (1 + \frac{2}{10})] = 5 \text{ мм}; \\ \delta_{op} &= \frac{22}{2} \cdot [1 - 0,8 \cdot (1 + \frac{2}{17,6})] = 1,2 \text{ мм}; \\ \delta_b &= \frac{1}{2} \cdot (d - d_{on}) = \frac{1}{2} \cdot (20 - 17,6) = 1,2 \text{ мм}. \end{aligned} \right\} \quad (54)$$

Во-вторых, осуществляем уточнённую оценку прочности в опасном сечении «D» (рис. 5) по примерам подобных расчётов (34), (35), используя зависимости (32) для моментов  $M_D$ ,  $M_{kp}$  при  $Y_n=Y_{on}=0,5705$  и геометрические характеристики  $W_n=W_{on}$ ,  $W_{\rho n}=W_{opn}$ , в которых  $X_n=X_{on}=0,8$ :

$$\begin{aligned} \sigma_{IV}^{(D)} &= \sqrt{\left(\frac{M_D}{W_{on}}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{M_{kp}}{W_{opn}}\right)^2} = \\ &= Y_{on} \cdot \sqrt{\left[\frac{5769}{1044,835 \cdot (0,9616 - X_{on}^4)}\right]^2 + 3 \cdot \left[\frac{1295,4}{2089,67 \cdot (0,9809 - X_{on}^4)}\right]^2} = \\ &= 5,8 \text{ кГ/мм}^2 < [\sigma] = 8 \text{ кГ/мм}^2. \end{aligned} \quad (55)$$

Комплексный анализ результатов выполненной работы позволяет сделать следующие выводы:

1) поставленная прикладная экстремальная задача решена классическим графо-аналитическим методом с применением необходимого (46) и достаточного (рис. 6) признаков, строго доказывающих, что функциональный критерий объёма  $V = V(X, X_n, Y_n)$ , зависящий от трёх переменных (2) и удовлетворяющий двум уравнениям связи (28), (42), действительно имеет относительный минимум  $V_{min} = 63993 \text{ мм}^3$ ;

2) оптимальное  $X_o = 0,5$  и граничные значения  $X_n = 1$ ,  $Y_n = 0$  (см. (43) и табл. 1) соответствуют, согласно (36), (44), объёму  $V(0,5; 1; 0) \equiv V_{gl} = V(1) = 83803 \text{ мм}^3$  полого бруса без дополнительной проточки, у которого  $b_n = 0$ ,  $d_n = d_{ob} = \text{const} = 10 \text{ мм}$ , и, по сравнению с  $V_{min}$ , такая конструкция тяжелее в 1,31 раза, то есть вал с проточкой на 31 % экономичнее гладкого по внутренней поверхности;

3) сопоставление  $V_{min}$  и  $V_{gl}$  с аналогичным параметром  $V_{cn}$  ротора-вала сплошного ступенчатого профиля ( $d_b = d_n = 0$ ) при тех же конструктивных габаритных размерах (рис. 5), имеющего

$$\begin{aligned} V_{cn} = V_{1cn} + V_{2cn} + V_{3cn} + V_{4cn} &= 0,25 \cdot \pi \cdot \left\{ d_c^2 \cdot B_c + d^2 \cdot [\ell_1 - 0,5 \cdot (B_c - \Pi)] + \right. \\ &\quad \left. + d_n^2 \cdot (\ell_2 - \Pi) + d^2 \cdot \Pi \right\} = 109405 \text{ мм}^3, \end{aligned} \quad (56)$$

дает снижение расхода стали, достигающее, соответственно, 60,1 % и 30,6 %.

В заключение можно отметить, что представленная здесь математическая модель оптимального прочного вала должна быть проверена на жёсткость (деформативность) и устойчивость [8, 10], но этот вопрос выходит за рамки тематики данной статьи.

1. Фролов К.В. Методы совершенствования машин и современные проблемы машиноведения. - М.: Машиностроение, 1984. - 224 с.
2. Абдеев Б.М. Прямой ступенчатый вал на двух опорах, имеющий минимальную материалоёмкость / Б.М. Абдеев, Г.А. Гурьянов, Е.А. Клименко // Вестник ВКГТУ. - 2013. - № 1. - Усть-Каменогорск. - с. 17-26.
3. Клименко Е.А. Прямой двухконсольный ступенчатый вал минимального объёма / Е.А. Клименко, Б.М. Абдеев, Г.А. Гурьянов // Материалы XIV Республ. НТК студентов, магистрантов и молодых учёных «Творчество молодых – инновационному развитию Казахстана», 7-9 апр. 2014 г. - Усть-Каменогорск, 2014. - Ч. II. - с. 47-48.
4. Абдеев Б.М. Прямой бесконсольный ступенчатый вал минимального теоретического объёма / Б.М. Абдеев, Г.А. Гурьянов, Е.А. Клименко // Сб. тр. «Проблемы совершенствования конструкций строительных, дорожных, коммунальных и аэродромных машин». - М.: МАДИ, 2014. - с. 6-10.
5. Клименко Е.А. Универсальная механико-математическая модель оптимизации геометрических параметров двухопорных валов минимальной материалоёмкости / Е.А. Клименко, Б.М. Абдеев, Г.А. Гурьянов // Материалы Междунар. НТК студентов, магистрантов и молодых учёных «Творчество молодых – инновационному развитию Казахстана», 9-10 апр. 2015 г. - Усть-Каменогорск, 2015. - Ч. II. - с. 73-77.
6. Лесин В.В. Основы методов оптимизации / В.В. Лесин, Ю.П. Лисовец. - М.: Изд-во МАИ, 1998. - 344 с.
7. Рейклейтис Г. Оптимизация в технике: В 2-х кн. / Г. Рейклейтис, А.А. Рейвиндран, К. Рэксдэл / Пер. с англ. В.Я. Алтаева, В.И. Моторина. - М.: Мир, 1986. - Кн. 1. - 351 с.
8. Биргер И.А. Расчёт на прочность деталей машин: Справ. / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. - М.: Машиностроение, 1979. - 702 с.
9. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. - Киев: Изд-во «Наукова думка», 1975. - 704 с.
10. Анульев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3-х т. - Изд. 5-е, перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1978. - Т. 2. - 559 с.
11. Дарков А.В. Сопротивление материалов / А.В. Дарков, Г.С. Шпиро. - М.: Высшая школа, 1969. - Изд. 3-е. - 734 с.
12. Ицкович Г.М. Руководство к решению задач по сопротивлению материалов / Г.М. Ицкович, А.И. Винокуров, Л.С. Минин. - М.: Россвязьиздат, 1963. - 352 с. (С. 68-70).
13. Серенсен С.В. Несущая способность и расчёты деталей машин на прочность: Руководство и справ. пособ. / С.В. Серенсен, В.П. Когаев, Р.М. Шнейдерович. - М.: Машиностроение, 1975. - Изд. 3-е, перераб. и доп. - 488 с.
14. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семенджяев. - М.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1962. - 608 с.
15. Любошиц М.И. Справочник по сопротивлению материалов / М.И. Любошиц, Г.М. Ицкович. - Минск: Изд-во «Вышэйшая школа», 1969. - 464 с.

Получено 20.05.2016

---

УДК 621.337.12

**А.Т. Жапарова, А.И. Квасов, А.Е. Бакланов**

Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева,  
г. Усть-Каменогорск

**МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАДАННЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ КАК ЭЛЕМЕНТА SMART-ТЕХНОЛОГИЙ**

Для организации работы альтернативных источников питания необходимо создавать устойчивые схемы работы, согласованные с имеющимися электрическими системами.

В настоящее время во всем мире переходят на использование солнечной энергии. Это позволяет экономить на изменении системы питания и позволит значительно уменьшить потребление энергии за счёт использования солнечных батарей. При преобразовании

солнечной энергии в электрическую или в тепловую окружающая среда не загрязняется. Генераторы для преобразования солнечной энергии в электрическую собирают из большого числа солнечных элементов. Солнечные батареи генерируют на свету значительную электрическую мощность и применяются, в основном, для автономных устройств различного назначения.

Внедрение солнечной энергетики приводит к решению задач эффективности работы энергообеспечения автономных объектов с учетом изменения окружающей среды. Моделирование процессов в системе преобразования энергии и систем электроснабжения позволяет предсказать ее функционирование при изменении внутренних и внешних условий.

При проектировании и эксплуатации автономных систем электропитания (СЭП) на основе солнечных батарей необходимо обеспечить выполнение энергобаланса в СЭП при известных энергетических характеристиках солнечной и аккумуляторной батарей и заданной временной диаграмме энергопотребления со стороны нагрузки. При этом необходимо оценить влияние деградационных изменений энергетических характеристик основных и буферных источников на работу СЭП. Выбор солнечных и аккумуляторных батарей следует произвести исходя из условия обеспечения энергобаланса. Также необходимо разработать и реализовать алгоритмы управления контроллером для обеспечения заданных режимов работы СЭП [1-2].

Для решения поставленной задачи необходимо разработать имитационную модель автономной системы электропитания. Для её выполнения воспользуемся средой визуального моделирования Simulink, входящей в состав пакета MatLAB. Одним из главных его достоинств является возможность моделирования, сочетающего методы структурного и имитационного моделирования. Такой подход в отличие от пакетов схемотехнического моделирования позволяет существенно упростить модель, а следовательно, повысить скорость вычислений, а также обеспечивает гибкость и трансформируемость системы под разрабатываемые алгоритмы [3].

На рис. 1 приведена разработанная модель автономной СЭП; на рис. 2 изображены параметры системы, которые могут задаваться пользователем. К таким относятся: ток короткого замыкания и напряжение холостого хода солнечного элемента, угол падения солнечных лучей на панель (в радианах), температура окружающей среды (К), количество СЭ в солнечной панели, заданные значения тока заряда и напряжения полного заряда АБ, а также уровень освещённости солнечной панели.

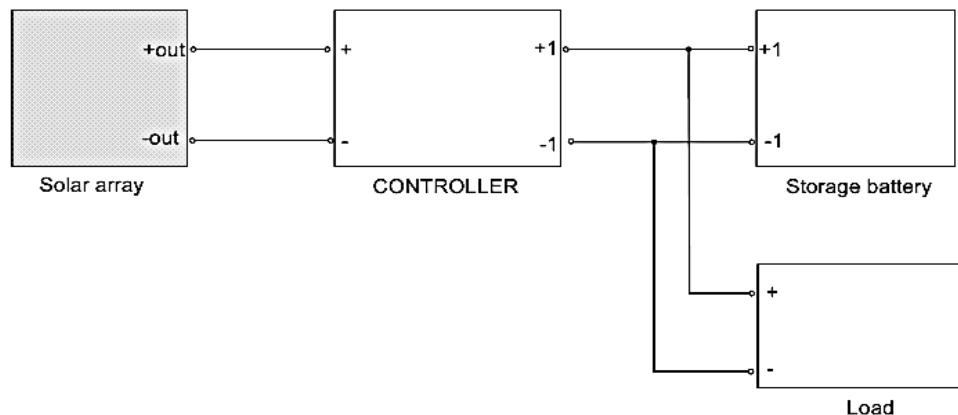


Рисунок 1 - Модель разработанной автономной системы

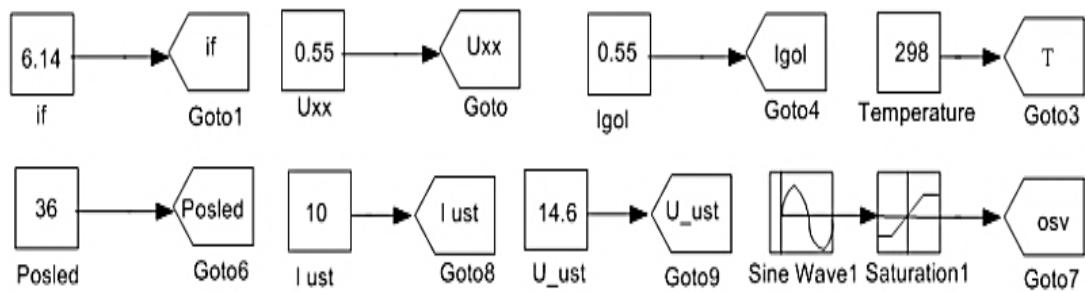


Рисунок 2 - Параметры модели разработанной автономной системы

Наиболее сложной составляющей системы является модель контроллера СБ, структурная схема которой приведена на рис. 3.

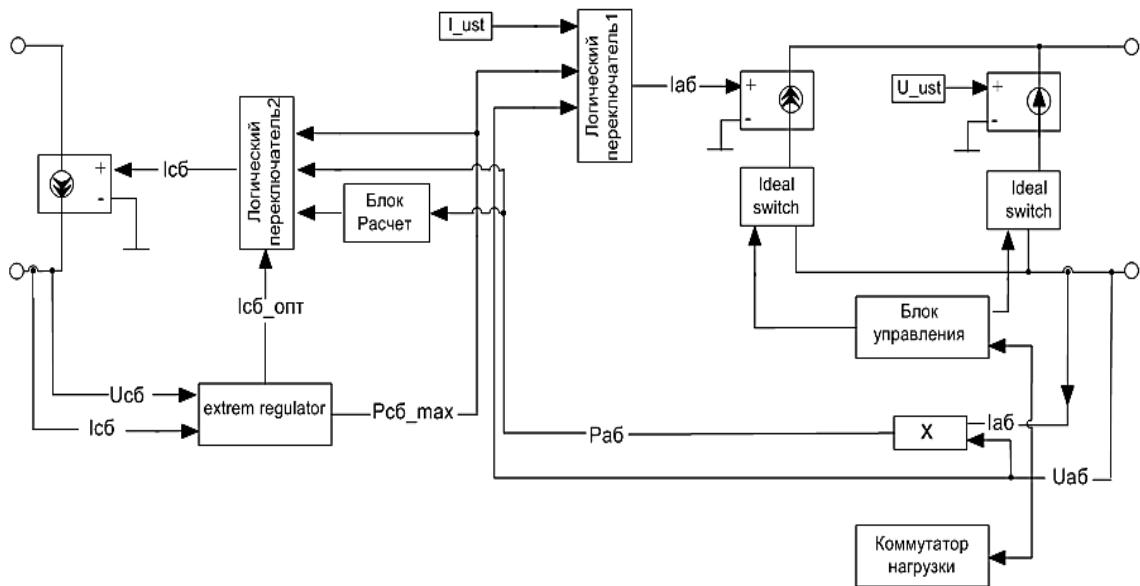


Рисунок 3 – Схема имитационной модели контроллера солнечной батареи

Модель контроллера солнечной батареи функционирует в нескольких режимах, в том числе в режиме экстремального регулирования. Более подробно с моделью контроллера можно ознакомиться в [1-2].

Модели солнечной батареи, контроллера солнечной батареи и аккумуляторной батареи рассмотрены в [3-4]. Иерархическая структура блока «Load» с потребителями электрической энергии (см. табл.) представлена на рис. 4.

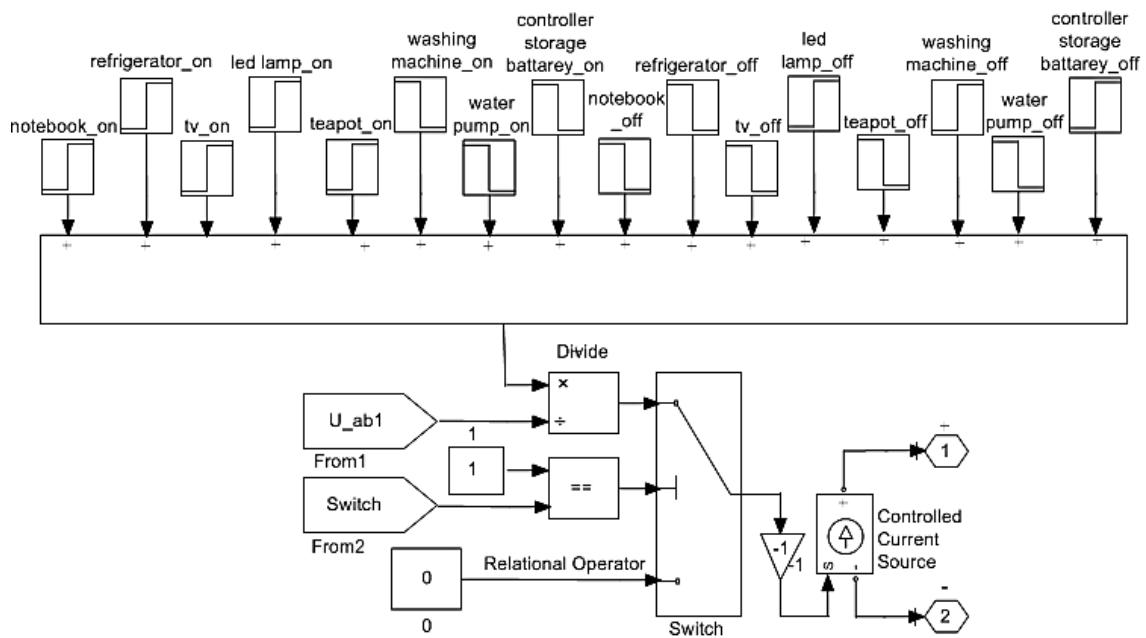


Рисунок 4 – Структура блока Load

Данная структура имитирует нагрузку, представленную в таблице.

#### Потребители электрической энергии

№	Наименование	Количество	Потребляемая мощность, Вт	Период использования
1	Ноутбук	1	65	12:00÷16:00
2	Холодильник	1	30	01:00÷00:00
3	Телевизор	1	40	20:00÷23:00
4	Светодиодные лампы	5	15	18:00÷24:00
5	Чайник	1	1800	06.00÷06.05 10.00÷10.05 18.00÷18.05 20.00÷20.05
6	Стиральная машина	1	1020	8.00-16.00
7	Водяной насос	1	300	06.00÷06.45 14.00÷14.45
8	Контроллер управления зарядом АБ	1	15	01:00÷00:00

На рис. 5 отражена задаваемая времененная диаграмма потребляемой мощности со стороны нагрузки.

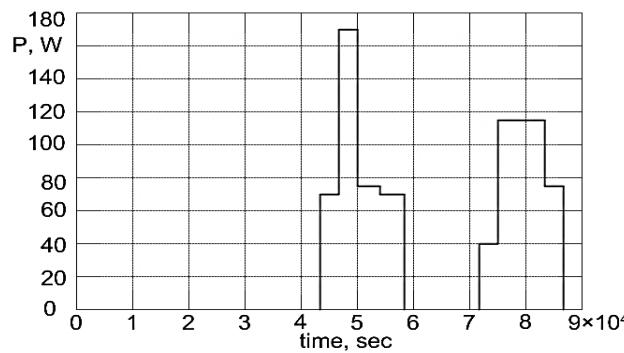


Рисунок 5 – Временная диаграмма потребляемой мощности

Рассмотрим работу модели в целом. Пусть относительная освещённость СБ изменяется в течение суток так, как показано на рисунке 6.

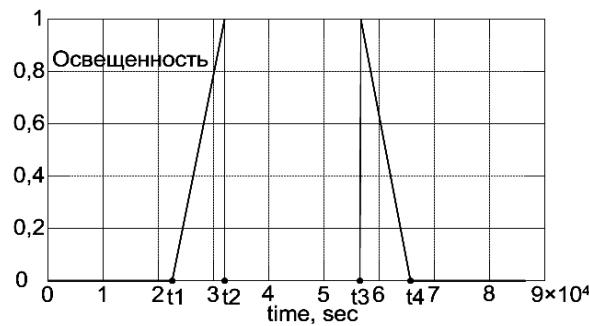


Рисунок 6 – Изменение уровня освещенности СБ в течение суток

Как видно из рисунка, СБ начинает освещаться в момент времени  $t_1$ , и к моменту времени  $t_2$  уровень освещенности достигает максимальной величины. В момент времени  $t_3$  уровень освещенности начинает снижаться и в момент времени  $t_4 = 7.5 \times 10^4$  СБ перестаёт освещаться.

На рис. 7 приведены временные диаграммы тока  $I_{AB}$  и напряжения  $U_{AB}$  аккумуляторной батареи за сутки. До момента времени  $t_1$  СБ не освещается и ток АБ = 0. В момент времени  $t_1$  на панель начинает падать солнечный свет и батарея начинает заряжаться током, определяемым по формуле  $I_{AB} = P_{AB} / U_{AB}$ . В момент времени  $t_2'$  происходит коммутация нагрузки (см. табл.) и ток заряда снижается. В момент времени  $t_4$  СБ перестаёт освещаться и АБ переходит в режим разряда. Согласно алгоритму работы контроллера отключение нагрузки производится при снижении напряжения на АБ до уровня 10,5 В.

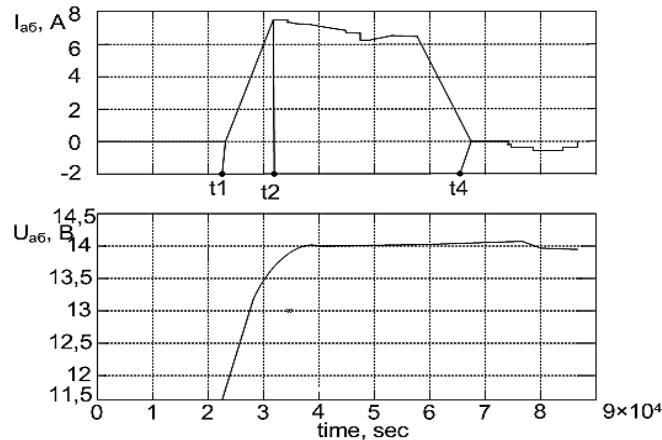


Рисунок 7 – Изменение тока и напряжения АБ в течение суток

Как видно из временной диаграммы, напряжение АБ остаётся выше 10,5 В и отключение нагрузки не происходит. Следовательно, энергобаланс в системе выполняется.

В заключение можно сделать следующие выводы:

1. В среде Simulink (MatLAB) разработана имитационная модель контроллера солнечной батареи. Данная модель адекватно отображает логику работы реального контроллера СБ, что позволяет использовать данную модель при проектировании автономных СЭП.

Разработаны и протестированы имитационные модели автономных систем электропитания: солнечной батареи, аккумуляторной батареи, контроллера солнечной батареи и нагрузки.

2. Из указанных выше элементов синтезирована модель автономной системы электропитания. Проведённое тестирование подтверждает адекватность разработанной модели. Модель может быть использована при проектировании реальных автономных систем электропитания.

#### Список литературы

1. Квасов И.А. Исследование эффективности низковольтной светодиодной системы освещения / И.А. Квасов, Д.Н. Титов, А.Т. Жапарова // Материалы VIX Междунар. конф. «Эффективность использования ресурсов и охрана окружающей среды – ключевые вопросы развития горно-металлургического комплекса» и XIII Междунар. научн. конф. «Перспективы технологий, оборудования и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов», 21-22 мая 2015 г. – Усть-Каменогорск: ВКГТУ. – 2015.
2. Бакланов А.Е., Титов Д.Н., Gyorok G., Жапарова А.Т. Study of the effectiveness of switching-on light-emitting-diode illumination devices and the use of low voltage power system in lighting. Acta Polytechnica Hungarica Newsletter (61). – Номер выпуска 5. – стр. 71-80, 2015 (DOI: 10.12700/APH.12.5.2015.5.4).
3. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 360 с.
4. Implement generic battery model. URL: <http://www.mathworks.com/help/physmod/powersys/ref/battery.html>.

Получено 16.05.2016

**Л.А. Жданов, А.А. Сливинский, Н.М. Стреленко, А.В. Нетяга**

НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев

**Ю.И. Лопухов**

Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева,  
г. Усть-Каменогорск

**ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И СТРУКТУРЫ ВЫСОКОКРЕМНИСТЫХ ФЛЮСОВ  
НА ОБРАЗОВАНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В МЕТАЛЛЕ ШВА  
ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКЕ ПОД ФЛЮСОМ**

Одной из актуальных проблем электродуговой сварки под флюсом является снижение уровня неметаллических оксидных включений в металле шва и оптимизация их морфологии. Технологические и металлургические аспекты рассматриваемой проблемы освещены во многих работах. Однако в большинстве случаев рассмотрены конкретные композиции флюс-проводники или влияние определенных раскислителей на формирование структуры металла шва и его механические свойства. Соответственно, существуют сформированные требования и рекомендации по снижению эндогенных неметаллических включений в металле шва, что позволяет в определенной степени повысить его механические свойства при использовании систем флюс-проводники, которые исследовались. Формирование общих выводов по воздействию определенных композиций сварочных материалов и соотношения компонентов в составе флюса на содержание неметаллических включений в металле шва должно быть осуществлено на основе моделирования процессов образования включений, используя принципы равновесной термодинамики растворов. Разработанная модель позволит проводить прогнозирование содержания неметаллических оксидных включений в металле шва при использовании флюсов различного состава.

Целью работы является создание расчетной термодинамической модели образования оксидных неметаллических включений в металле шва при электродуговой сварке под флюсом общего назначения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- сформулировать основные принципы применения равновесной химической термодинамики для моделирования процесса образования оксидных неметаллических включений в металле шва;
- создать термодинамическую модель определения содержания оксидных неметаллических включений в металле шва при электродуговой сварке под флюсом;
- провести экспериментальные исследования для оценки адекватности разработанной модели образования оксидных неметаллических включений при использовании флюсов различных шлаковых систем и при переменном соотношении компонентов в составе флюса.

Для решения поставленных задач необходимо разработать физическую и термодинамическую модель процесса образования неметаллических включений в металле шва с учетом всех взаимодействующих фаз и массопотоков, которые влияют на формирование сварочной ванны. Провести наплавки опытных образцов при использовании флюсов различных шлаковых систем общего назначения и металлографические исследования металла шва. Определить содержание легирующих элементов в металле шва, которые определяются окислительно-восстановительными процессами. Провести анализ полученных результатов и сформулировать рекомендации по применению разработанной термодинамической модели.

Процесс электродуговой сварка основан на ряде физических и химических превраще-

ний веществ и энергии. При сварке протекают такие процессы, как растворение и выделение веществ из раствора, испарение, диссоциация химических соединений и многоатомных газов, ионизация газов, взаимодействие компонентов газовой, шлаковой и металлической фаз с образованием сложных комплексных соединений. Протекают обменные и окислительные процессы, разнообразные химические реакции, в том числе на межфазных границах [1, 2].

Характер и количество одновременных физико-химических явлений, протекающих в реакционной зоне сварки, зависит от способа и режима сварки, типа, индивидуальных свойств и состава присадочных материалов и материалов, которые свариваются. Базой для их изучения при сварке является химическая равновесная термодинамика – наука, позволяющая оценить пределы и направление протекания процессов в замкнутой термодинамической системе, сопровождающихся изменением ее энергии. При этом с помощью основных термодинамических характеристических функций (энталпии, энтропии и теплоемкости) участников реакции равновесная химическая термодинамика позволяет провести определение направления химических реакций, температуры начала и окончания процесса как диссоциации, так и образования соединений, температуру перехода элементов и соединений в жидким и газообразном состоянии, состав фаз, появляющихся в результате реакций [1, 3].

При электродуговой сварке под флюсом в процессе охлаждения газы частично выделяются, однако значительное количество их остается в металле. Протекание всех процессов происходит с большой скоростью. Однако, в связи с кратковременностью существования расплава и постоянным обновлением взаимодействующих фаз, часть реакций и процессов в зоне сварки может не доходить до полного завершения и, следовательно, не достигать равновесного состояния. Это и определяет физико-химические и механические свойства сварного шва [2, 3].

Насыщение металла газами приводит, как показали многочисленные эксперименты, к изменению механических свойств металла и к нарушению однородности шва. Наличие неметаллических включений в металле резко снижает его пластичность и ударную вязкость. Присутствие неметаллических включений в наплавленном металле способствует также образованию трещин в сварном соединении. Поэтому важно знать кинетику процессов насыщения металла газами и выделения их из металла [2, 3].

Для создания физической модели образования неметаллических включений в металле шва при электродуговой сварке под флюсом необходимо знать, какие физико-химические процессы протекают в реакционной зоне.

Процессы, протекающие при сварке под флюсом, отличаются от других электродуговых способов сварки тем, что в реакционной зоне присутствуют три взаимодействующие многокомпонентные фазы: расплавленный шлак, расплавленный металл и газовая фаза. Таким образом, считается, что основной массообмен элементами протекает на границе шлак-металл.

При электродуговой сварке под флюсом сварочный дуговой разряд обеспечивает наличие расплавленного флюса, образующего шлаковый купол, который, в свою очередь, укрывает сварочную дугу от взаимодействия с воздухом. Газообразные оксиды и пары элементов из столба дуги могут переходить через шлаковый купол в воздух. Обратный массообмен, из воздуха в зону сварки, менее вероятен, хотя иногда происходит попадание азота из воздуха в зону сварки.

Электродный металл переносится в сварочную ванну мелкими или крупными каплями, которые замыкают или укорачивают дуговой промежуток, и каплями, которые сползают по шлаковому куполу. Газовые пузыри всплывают из жидкого металла и шлака и

попадают в атмосферу газового купола. Этому процессу мешает частично расплавленный флюс, поэтому на поверхности шлаковой корки образуются поры. Мелкие капли жидкого металла тяжелее шлака, поэтому они оседают в сварочную ванну. Шлаковые капли легче металла, поэтому они поднимаются вверх сварочной ванны и переходят в шлак. Капли шлака, которые не успели выйти из ванны и перейти в шлак, образуют шлаковые экзогенные включения.

Дуга интенсивно плавит и испаряет электродный металл. Передним фронтом дуги плавится и испаряется флюс и основной металл. Чем длиннее дуговой промежуток, тем больше напряжение на дуге и быстрее плавится и испаряется шлак. В дуговом промежутке, вследствие высокой температуры, оксиды и другие соединения диссоциируют.

Столб дуги в направлении от электрода к ванне расширяется, тем самым создает мощный плазменный поток от электрода к ванне. Плазменный поток заставляет перемещаться пары электродного металла и шлака, мелкие капли и газы в реакционной зоне сварки. По мере удаления от центра дуги температура плазмы снижается, тем самым создавая условия для образования оксидов, конденсирующихся в шлаке. В приэлектродной области элементы могут как растворяться в сварочной ванне, так и испаряться из раствора.

На основе вышесказанного, была разработана физическая структурная схема образования оксидных неметаллических включений при электродуговой сварке под флюсом (рис. 1) [4].

Поглощение металлической фазой кислорода начинается уже на стадии существования капли на торце электрода. Температура капли позволяет протекать реакциям образования оксидных неметаллических включений. С другой стороны, из расплавленного флюса в ионизированную и неионизированную плазму попадает оксид этого металла. В ионизированной плазме очень высокая температура, поэтому он частично распадается на компоненты, и все эти компоненты и сам оксид, который частично продиссоциировал, переходят в неионизированную плазму. С неионизированной плазмы часть оксида переходит обратно в расплавленный флюс. Другие все компоненты переходят в виде газов в сварочную ванну и каплю.

Переходящая в расплав жидкой ванны капля электродного металла содержит элементы, образующие оксидные включения, растворенный кислород и оксиды, которые образовались на стадии капли. В сварочной ванне также протекают реакции образования оксидных неметаллических включений. Эта реакция протекает до температуры солидуса. В реакционной зоне сварки взаимодействующие расплав ванны и капли электродного металла контактируют с расплавленным шлаком, который в дальнейшем образует шлаковую корку. На межфазной границе взаимодействия расплава металла и шлака, в хвостовой части сварочной ванны, происходит взаимосвязанный переход оксидов металлов как из жидкой ванны в шлак, так и в обратном направлении. При дальнейшем охлаждении сварочная ванна кристаллизуется, образуя металлы шва. В этом металле шва остаются оксиды, которые не успели перейти в шлак, нерастворенный кислород и металлы, которые не образовали химические соединения.

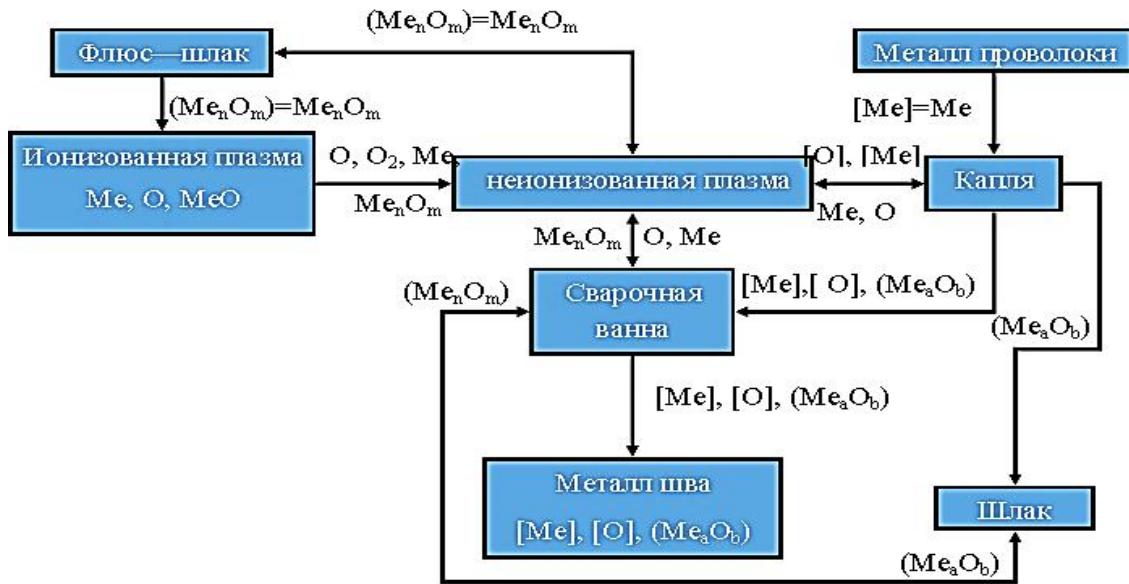


Рисунок 1 - Структурная схема образования оксидных неметаллических включений в металле шва при электродуговой сварке под флюсом

Нами была разработана термодинамическая модель, с помощью которой можно определить содержание неметаллических оксидных включений в металле шва [4, 5]. На рис. 2 представлена структурная схема данной модели.

Она состоит из 4-х основных блоков, в которые закладываются исходные данные, необходимые для расчета:

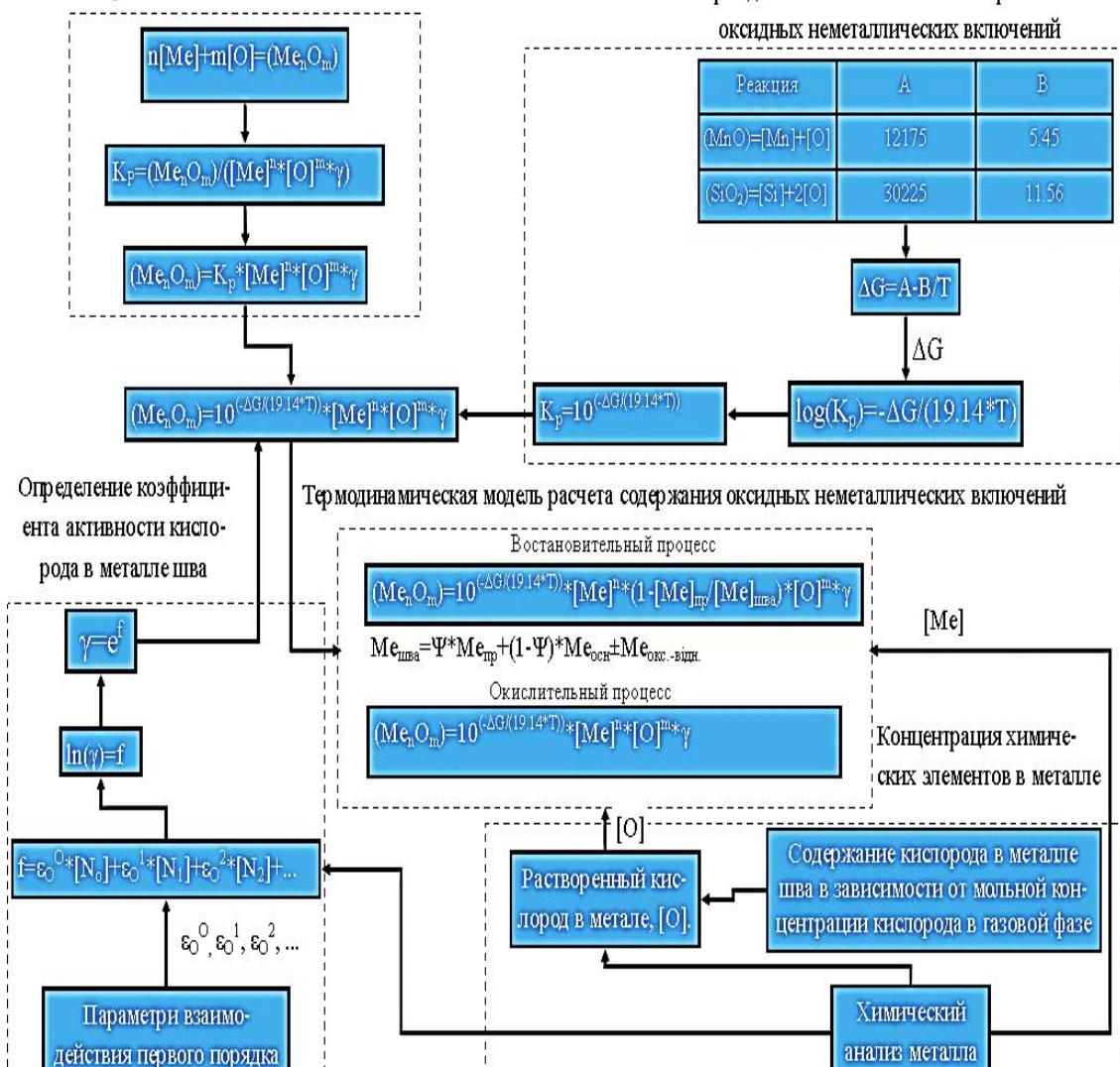
- 1) концентрация химических элементов в металле шва;
- 2) термодинамические характеристики образования оксидных неметаллических включений;
- 3) определение коэффициента активности кислорода в металле шва;
- 4) реакции образования оксидных неметаллических включений.

В блоке концентрации химических элементов в металле шва представлены данные химического анализа металла наплавленных валиков (табл. 1) и анализ сварочной проволоки (табл. 2). Химический состав металла наплавленных валиков получен с помощью метода «мокрой химии».

Таблица 1  
Химический состав наплавленного металла

Марка сварочного флюса	Массовая доля элементов, %				
	C	Si	Mn	S	P
ESAB OK 10.71	0,05	1,214	2,58	0,022	0,028
АН-348 А	0,035	0,97	2,57	0,031	0,029
ОСЦ-45	0,04	0,2	2,3	0,023	0,026
АН-60	0,045	1,065	2,81	0,035	0,026
АН-47	0,05	0,826	1,98	0,026	0,026
АН-44	0,035	0,749	0,34	0,029	0,024

## Реакция образования оксидных неметаллических включений



\*  $\Psi = 1$  при многослойной наплавке

Рисунок 2 - Структурная схема термодинамической модели, определяющей содержание неметаллических оксидных включений в металле шва при электродуговой сварке под флюсом

Таблица 2

Химический состав сварочной проволоки Св-08Г2С

Сварочная проволока	Массовая доля элементов, %				
	Si	Mn	Al	S	P
Св-08Г2С	0,446	2,03	0,03	0,016	0,026

В блоке термодинамических показателей образования оксидных неметаллических

включений приведены экспериментальные данные протекания химических реакций с растворенным кислородом в металле шва [4,5]. Температурные зависимости константы равновесия приведены в табл. 3 [6].

Таблица 3  
*Зависимость константы равновесия от температуры [6]*

Реакция	$\log(K_p) = -A/T + B$	
	A	B
$(SiO_2)=[Si]+2[O]$	30225	11,56
$(MnO)=[Mn]+[O]$	12175	5,45

В блоке определения коэффициента активности кислорода в металле шва, в параметрах взаимодействия, предложенных Вагнером для многокомпонентных растворов [7, 8], учтено взаимное влияние компонентов на коэффициенты их активности.

Последним блоком, который задает входные параметры, являются химические реакции образования оксидных неметаллических включений.

Константа равновесия выражается через мольные концентрации участников реакции и их коэффициенты активности. Коэффициент активности кислорода находится с помощью расчетов, приведенных в предыдущем блоке. Коэффициенты активности металлов  $[Me]$  принимаются равными 1.

При учете всех блоков структурной схемы в одном уравнении получаем расчетную термодинамическую модель, позволяющую рассчитывать мольное содержание оксидных неметаллических включений в металле шва.

Так как расчет проводится для многослойной наплавки металла, то необходимо учитывать коэффициент наплавленного металла, который позволяет получить химический состав металла сварного шва.

Полученная расчетная термодинамическая модель, в зависимости от характера протекающих процессов, предполагает расчет как для реакций восстановительного, так и окислительного типа. Константа равновесия для расчета экспортируется из блока термодинамических показателей.

Для анализа микроструктуры шва проводились исследования неметаллических включений (НВ) в металле шва, полученных под флюсами ОК 1071 (агломерированный флюс), АН-348А, ОСЦ-45, АН-47, АН-44 (плавленый флюс), АН-60 (пемзovidный флюс). Все флюсы являются высококремнистыми и относятся к одной шлаковой системе  $SiO_2-MnO-CaO-Al_2O_3$ .

Установлено, что в зависимости от состава флюса характер насыщения металла шва НВ изменяется. Форма и размер включений существенно изменяется. Наблюдается накопление, укрупнение и изменение формы НВ в верхней части сварочной ванны, что свидетельствует об их всплытии с возможностью дальнейшего перехода в шлак. В зонах расположения и накопления НВ наблюдаются массопотоки в сварочной ванне, которые соответствуют существующим моделям перемешивания расплавленного металла [9].

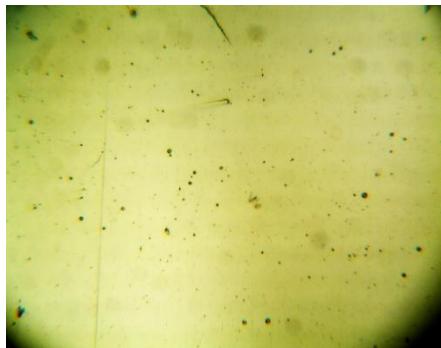
Наиболее мелкодисперсный характер НВ наблюдается на пемзovidном флюсе АН-60 и на плавленом флюсе ОСЦ-45, но количество этих включений гораздо больше (рис. 3).



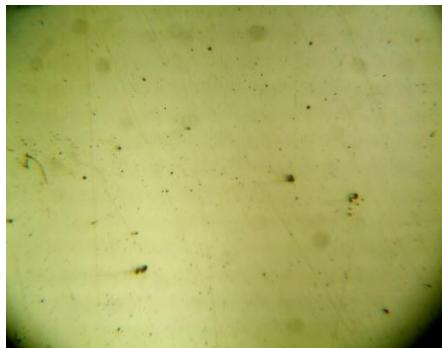
OK 10.71



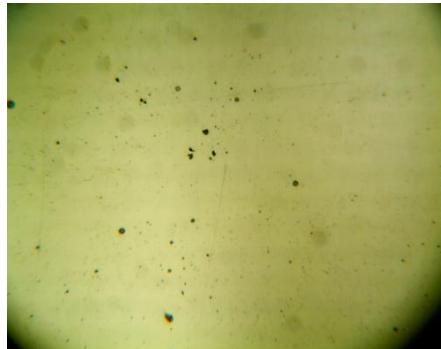
AH-348 A



ОСЦ-45



AH-47



AH-60



AH-44

Рисунок 3 - Оксидные неметаллические включения в металле шва при сварке под промышленными флюсами разных марок на краю валика (х 640)

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1) установлено, что при электродуговой сварке под флюсом определенной шлаковой системы на основе комплекса оксидов  $\text{SiO}_2\text{-MnO-CaO-Al}_2\text{O}_3$  образуются НВ разной морфологии с переменной объемной долей их в металле шва. Морфология НВ и их размер напрямую связан со структурой флюса;

2) проанализировав процесс электродуговой сварки под флюсом, была разработана физическая модель образования неметаллических оксидных включений в металле шва;

3) предложена термодинамическая модель образования оксидных неметаллических

включений в металле шва при электродуговой сварке под флюсом на основе созданной физической модели;

4) полученные экспериментальные данные на микрошлифах качественно подтверждают возможность использования предложенной термодинамической модели для прогнозирования неметаллических включений.

Список литературы

1. Жданов Л.А. Фізико-хімічні процеси при зварюванні та наплавлені: Методичні вказівки до виконання курсової роботи / Л.А. Жданов, Н.М. Стреленко, В.Л. Коваленко. - Київ: НТУУ «КПІ», 2012. - 52 с.
2. Волченко В.Н. Теория сварочных процессов: Учеб. для вузов по специальности «Оборудование и технология сварочн. пр-ва» / В.Н. Волченко, В.М. Ямпольский, В.А. Винокуров и др.; Под ред. В.В. Фролова. - М.: Выш. шк., 1988. - 559 с.
3. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. акад. Патона Б.Е. - М.: Машиностроение, 1974. - 768 с.
4. Жданов Л.А. Розрахунок вмісту неметалевих включень у металі шва за допомогою рівноважної термодинаміки / Л.А. Жданов, А.В. Нетяга // Матеріали сьомої Всеукраїнської міжгалузевої наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та наукових співробітників «Зварювання та споріднені технології і процеси», 14-16 травня, 2014. - Київ, 2014. - С. 13.
5. Жданов Л.А. Термодинамічна модель утворення оксидних неметалевих включень у металі шва при дуговому зварюванні під флюсом / Л.А. Жданов, А.В. Нетяга // VIII Міжнар. конф. молодих учених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології», 20-22 травня, 2015. - Київ, 2015 року. - С. 212.
6. Чернова Л.А. Термодинамика процессов взаимодействия кислорода с металлическими расплавами систем Fe-V-Cr (Mn)-Si-O-C / Л.А. Чернова, Г.Г. Михайлов // Вестник ЮУрГУ. - 2005. - № 3. - С. 24-27.
7. Цымбал В.П. Математическое моделирование металлургических процессов. - М.: Металлургия, 1986. - 240 с.
8. Коновалов А.В. Теория сварочных процессов / А.В. Коновалов, А.С. Куркин. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. - 748 с.
9. Жданов Л.А. Дослідження особливостей утворення неметалевих включень при зварюванні під флюсами загального призначення / Л.А. Жданов, А.В. Нетяга // Восьма Всеукраїнська міжгалузева наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та наукових співробітників «Зварювання та споріднені процеси і технології», 10-12 червня, 2015. - Київ, 2015 року. - С. 51.

Получено 20.05.2016

УДК 622.234:622.251 (075)

**Т.М. Кумыкова, В.Х. Кумыков**

Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева,  
г. Усть-Каменогорск

**СТРОИТЕЛЬСТВО И ИСПЫТАНИЯ ГИДРОПНЕВМОАККУМУЛЯТОРОВ  
НА РУДНИКАХ ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА**

Анализ практики эксплуатации рудничных пневмоэнергокомплексов выявил ряд недостатков в существующих технологиях регулирования производительности компрессоров [1, 2]. Установлено, что повышение давления сжатого воздуха в рудничных сетях должно обеспечиваться не только простым наращиванием мощностей компрессорных станций, но и одновременным увеличением коэффициента использования компрессоров [3, 4].

В часы минимального потребления сжатого воздуха пневмоприемниками мощности компрессорных станций используются неэффективно: вырабатываемая ими пневматиче-

ская энергия расходуется впустую. Подача пневматической энергии к местам ее потребления осуществляется по рудничным магистральным воздухопроводам, протяженность которых достигает десятки километров. Суммарные потери пневмоэнергии при эксплуатации пневматического хозяйства рудников и шахт составляет 25-35 % от вырабатываемого компрессорными станциями сжатого воздуха [1, 2].

Для сокращения непроизводительных потерь сжатого воздуха и стабилизации его давления в рудничных воздухопроводных сетях в странах СНГ (Россия, Казахстан) и зарубежной горной практике (США, Финляндия, Монголия) применяют подземные хранилища сжатого воздуха [5-9]. Использование гидропневматических аккумуляторов (ГПА), возводимых на пути движения сжатого воздуха, позволяет накопить его в пневмокамере в периоды минимального потребления технологическими машинами с пневмоприводом, а в периоды максимального использования - дополнить подачу компрессоров сконструированными запасами воздуха.

Проведенное обследование пневмоэнергокомплекса Тишинского рудника (г. Риддер, ВКО), который содержит в своем составе центробежные компрессоры, показало, что перепад давления сжатого воздуха у технологического оборудования в течение рабочей смены составляет более 0,2 МПа: от 0,65 МПа в начале и конце смены до 0,45-0,4 МПа в ее наиболее напряженные часы [7].

Результаты исследований позволяют заключить, что одним из путей в устраниении приведенных недостатков работы пневмоэнергокомплекса является автоматизация пневматического хозяйства шахт и рудников. Принципиально возможно построение автоматизированной системы на основе одного из следующих вариантов:

- управление характеристикой компрессорной станции  $P_{kc} = f(Q_{kc})$ ;
- управление характеристикой пневмосети  $P_{nc} = f(Q_{nc})$ ;
- комбинирование двух предыдущих способов.

Одним из положительных эффектов включения ГПА в состав пневмоэнергокомплекса рудника является то, что его наличие позволяет замкнуть в отдельности характеристики компрессорной станции и пневмосети на характеристику ГПА. В первом приближении характеристика ГПА представляет собой горизонтальную линию  $P_{GPA} = \text{const}$ . Но этот режим действует только во время активной работы ГПА.

Включение ГПА в состав шахтного пневмоэнергокомплекса позволяет управлять работой компрессоров вне зависимости от потребляемого шахтной пневмосетью в каждый момент времени количества сжатого воздуха. Это дает возможность аккумулировать избытки сжатого воздуха, имеющиеся при работе компрессорной станции в межсменные перерывы, с последующим использованием их для восполнения дефицита сжатого воздуха в рабочую смену.

Анализ пневмоэнергокомплекса Белоусовского рудника (ВКО) показал, что при общей производительности компрессорных станций 12 м<sup>3</sup>/с дефицит сжатого воздуха в пиковые нагрузки составляет 3,33 м<sup>3</sup>/с [10]. Среднее давление сжатого воздуха в действующих забоях составляет 0,4 МПа, что снижает производительность пневмоприемников на 20-30 %. Продолжительность пиковых нагрузок составляет 2,1 ч в течение смены. Колебания давления в шахтной пневматической сети в течение смены находятся в пределах 0,08-0,3 МПа.

С целью повышения эффективности эксплуатации пневмоэнергокомплекса Белоусовского рудника был построен гидропневматический аккумулятор сжатого воздуха. Проведены испытания эксплуатации ГПА как в режиме компенсации, так и в режиме постоян-

ной эксплуатации. По результатам испытания определены эффективность и наиболее рациональный режим эксплуатации ГПА в системе пневмоэнергокомплекса подземного рудника [10, 11].

При обработке результатов замеров сжатого воздуха в пневмоэнергокомплексе без ГПА установлено следующее.

Давление сжатого воздуха в забое при неработающих пневматических приемниках (перфораторы, буровые станки и т.д.) колеблется в пределах 0,5-0,7 МПа. Давление сжатого воздуха в действующих забоях при работающих пневматических приемниках изменяется в пределах 0,35-0,5 МПа, причем преобладающим является давление сжатого воздуха, равное 0,4-0,48 МПа. Продолжительность пиковых нагрузок в течение смены достигает 1,7-3,4 часа, а превалирующим является пиковый период продолжительностью 2,1 часа в смену (рис. 1, 2).

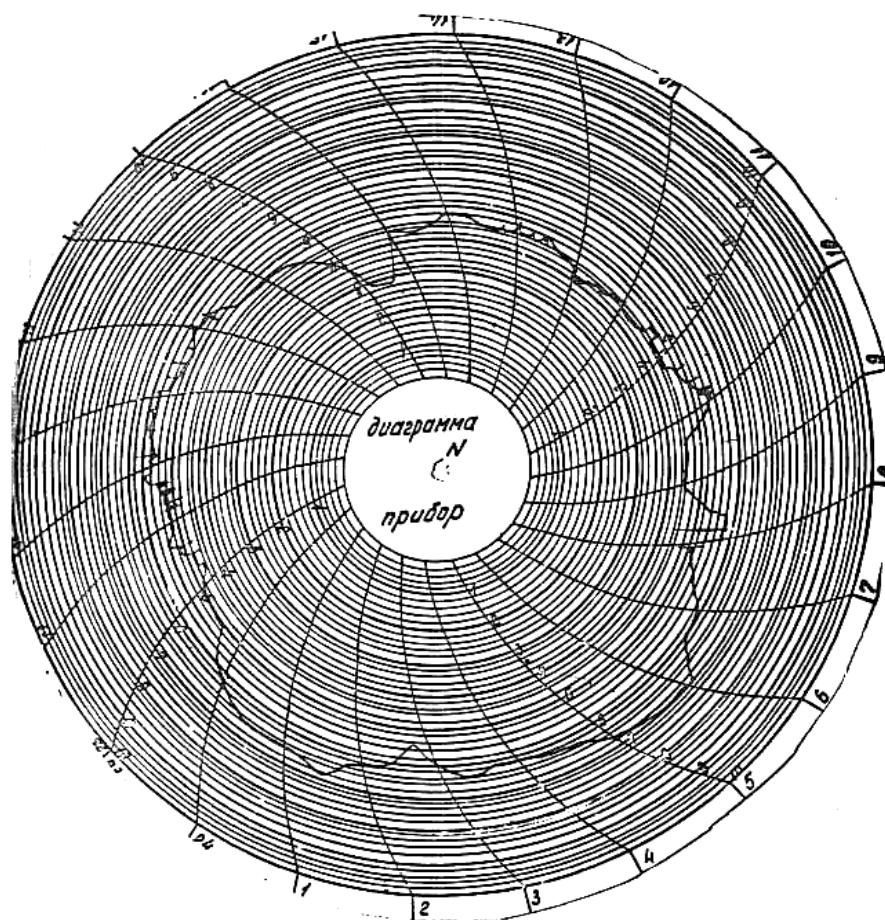


Рисунок 1 - Суточная диаграмма сжатого воздуха у действующего забоя без влияния ГПА

Давление сжатого воздуха на компрессорной станции в период замеров колеблется в пределах 0,58-0,8 МПа. Преобладающим является давление, равное 0,6-0,7 МПа. Колебание давления сжатого воздуха равняется 0,22 МПа, превалирующим – 0,15 МПа. В работе

находится в среднем 4-5 компрессоров. Колебание давления сжатого воздуха в течение смены составляет 0,1-0,3 МПа.

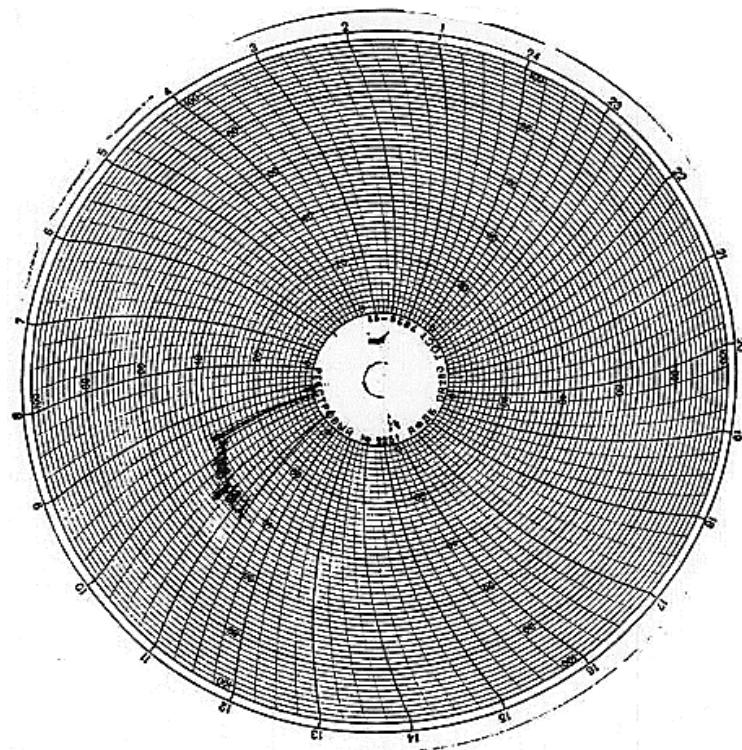


Рисунок 2 - Диаграмма давления сжатого воздуха у действующего забоя  
в часы «пик» без влияния ГПА

Таким образом, результаты выполненных исследований позволяют сделать вывод, что наличие в системе шахтного пневмоэнергокомплекса гидропневматического аккумулятора выводит работу пневмосистемы на принципиально новый режим работы, при котором характеристики компрессорной станции и шахтной пневмосети замыкаются каждая в отдельности на характеристику ГПА. Ввод ГПА в состав пневмосистемы позволяет реализовать систему автоматического регулирования работы пневмокомплекса на качественно новых принципах: за счет управления режимами накопления сжатого воздуха в ГПА и согласования работы компрессорной станции и ГПА во времени.

При строительстве ГПА необходима гидро- и воздухоизоляция трещиноватых горных выработок, что увеличивает стоимость их строительства. Это является одной из причин малочисленного применения гидропневмоаккумуляторов на шахтах и рудниках. Если снижение первоначальных затрат на строительство ГПА возможно на 50-60% за счет использования горных выработок на отработанных горизонтах, то устранение неблагоприятных горно-геологических условий требует выполнения комплекса гидроизоляционных работ по герметизации подземных камер.

Для создания надежной водо- и газоизоляции камер ГПА были продолжены исследовательские и экспериментальные работы в различных горно-геологических условиях их заложения. Наиболее сложным вопросом при строительстве ГПА является выбор изоля-

ции подземной напорной камеры (пневмокамеры). При строительстве ГПА в плотных горных породах, характеризующихся малым раскрытием трещин, конструкция изоляции по длине напорной камеры должна приниматься дифференцированно в зависимости от нарушенности горного массива.

В условиях Иртышского рудника требуется производить более качественную изоляцию ГПА. Поэтому было решено применить комплекс изоляционных работ, включающий бетонирование и торкретирование с добавками, значительно улучшающими свойства бетона и торкрет-бетона, нанесение пластических составов на торкрет-бетон и бетон.

На рис. 3 показана пневмокамера № 1 ГПА, забетонированная монолитным бетоном марки 200. Изоляция пневмокамеры № 2 (рис. 4) осуществлялась бетонированием поверхности ослабленных участков выработки с большим значением трещинной пустотности с укладкой монолитного бетона марки 200 и торкретирования всей поверхности выработки полимерторкрет-бетоном. Изоляция гидрокамеры производилась нанесением на поверхность камеры торкрет-бетона.

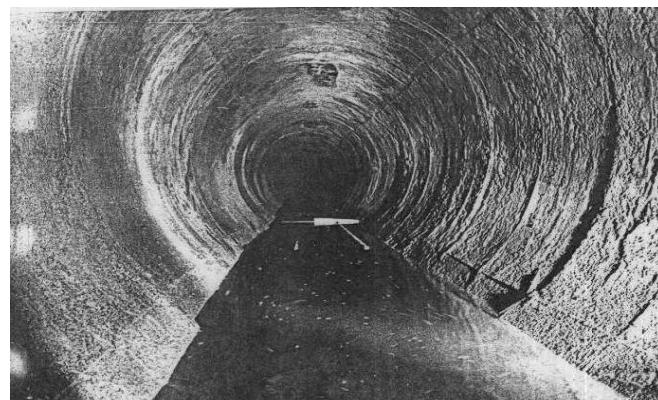


Рисунок 3 - Пневмокамера № 1

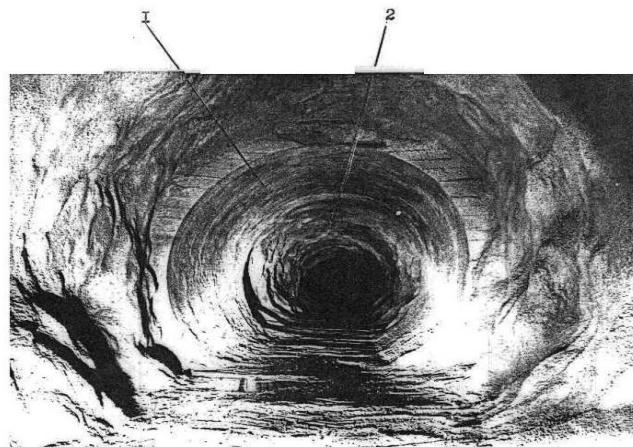


Рисунок 4 - Пневмокамера № 2: 1 – монолитный бетон; 2 – торкрет-бетон

Анализ возможных вариантов облицовок для эффективной герметизации емкостей под

сжатый воздух показал, что в качестве наиболее целесообразного типа покрытия выработок является цементно-бетонное с добавлением синтетического латекса СКС-65ГП [12]. Введение в цементно-песчанные составы латекса в количестве 20 % от веса цемента в виде водно-латексной эмульсии позволяет значительно улучшить целый комплекс их показателей применительно к задачам пневмогидроизоляции.

Таким образом, были решены наиболее сложные вопросы строительства ГПА повышенного давления сжатого воздуха с искусственной изоляцией пневмокамер, в которых при давлении в них свыше 1,0 МПа должны быть исключены утечки сжатого воздуха и воды.

#### Список литературы

1. Миняев Ю.Н. Оптимизация развития рудничных компрессорных установок / Ю.Н. Миняев, А.В. Угольников, А.Х. Зарипов // Горн. информ.-аналит. бюл. (научно-технический журнал) Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). – 2009. – № 2.
2. Миняев Ю.Н. Влияние дестабилизирующих факторов на прогнозирование структурного кризиса пневмоэнергетических систем // Горн. журн. – 2008. – № 5.
3. Багаутинов Г.А. Применение гидропневмоаккумуляторов для снижения удельных расходов электроэнергии компрессорами промышленных предприятий / Г.А. Багаутинов, М.А. Плотников // Вестник энергосбережения. – 1999. – № 7(8). – Екатеринбург, 1999.
4. Кумыкова Т.М. Исследование динамических характеристик шахтного гидропневмоаккумулятора сжатого воздуха / Т.М. Кумыкова, В.Х. Кумыков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2013. – № 5.
5. Хронусов Г.С. Расчет основных параметров гидропневматического аккумулятора / Г.С. Хронусов, Ю.Н. Миняев, А.В. Угольников // Горн. журн. – 2005. – № 3.
6. Павлов В.Д. Опыт строительства и эксплуатации гидропневматических аккумуляторов в Финляндии / В.Д. Павлов, В.К. Мирошниченко // Горн. журн. – 1982. – № 6.
7. Внедрение комплекса мероприятий, направленных на снижение непроизводительных потерь сжатого воздуха на Тишинском руднике: Инф. карта / ВНИИцветмет. – Усть-Каменогорск, 1986.
8. Исследование влияния ГПА на эффективность работы пневмоприемников и режим работы компрессорной станции на Белоусовском руднике: Инф. карта / ВНИИцветмет. – Усть-Каменогорск, 1988.
9. Проведение ведомственных приемочных испытаний гидропневматического аккумулятора сжатого воздуха на Белоусовском руднике ИПК: Инф. карта / ВНИИцветмет. – Усть-Каменогорск, 1986.
10. Каменев Г.П. Опыт строительства и результаты испытаний гидропневматического аккумулятора сжатого воздуха / Г.П. Каменев, А.В. Салманов // Горн. журн. – 1989. – № 12.
11. Запроектировать и построить гидропневматический аккумулятор с повышенным давлением сжатого воздуха на Иртышском руднике: Инф. карта / ВНИИцветмет. – Усть-Каменогорск, 1990.
12. Павлов В.Д. Влияние трещиноватости горного массива на выбор способа гидроизоляции подземных хранилищ / В.Д. Павлов, В.К. Мирошниченко // Совершенствование техники и технологии подземной добычи руд цветных металлов. – Усть-Каменогорск, 1981.

Получено 18.05.2016

---

УДК 621.791

**Ю.И. Лопухов, Б.М. Токтаубаев**

Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева,  
г. Усть-Каменогорск

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ СВАРКИ TiG ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА  
С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ**

В настоящее время высокопрочный чугун с шаровидным графитом (ВЧШГ) из-за своих положительных свойств по коррозионной стойкости, механическим свойствам и экономичности все шире начинает использоваться при прокладке трубопроводных систем холодного и горячего водоснабжения, водоотведения, нефтедобычи в России, странах Европы и США взамен стальных.

Эта проблема не менее важна для Казахстана. ВЧШГ является самым чистым экологичным материалом, а по прочности не уступает стали. Поэтому обеспечение городов и населённых пунктов питьевой водой на огромной территории с удаленным расположением источников питьевой воды трубопроводами из ВЧШГ явилось бы уникальным проектом для Казахстана.

Существовавшая долгие годы в СССР нормативная база по строительству инженерных коммуникаций трубопроводных систем основывалась на принципе минимизации капитальных затрат и стоимости строительно-монтажных работ. При этом не учитывались надежность применяемых материалов, условия эксплуатации трубопроводов и организационно-технические возможности эксплуатационных предприятий. Именно по этим причинам подавляющее большинство трубопроводов сетей водопроводов и теплоснабжения проложено из стальных труб.

Анализ результатов научных исследований и передовых технологий зарубежных стран, а также эксплуатация экспериментальных инженерных сооружений, построенных из труб ВЧШГ, свидетельствуют об их надежной работоспособности и долговечности не менее 40 лет.

К основным преимуществам ВЧШГ перед сталью и полимерными материалами относятся: высокая коррозионная стойкость, вполне приемлемые прочность и пластичность (временное сопротивление - до 420 МПа, угол загиба - до 80° и относительное удлинение - до 13 %, соответственно) [1]. Трубопроводы из ВЧШГ надежно выдерживают ударные нагрузки, возникающие при резком изменении давления в трубопроводах, а также сохраняют прочность в просадочных и пучинистых грунтах. По стойкости к аварийным разрушениям трубопроводы из ВЧШГ превосходят даже стальные трубопроводы, а коррозионная стойкость их в 5 раза выше, чем у стальных трубопроводов.

Однако, учитывая все преимущества чугуна как конструкционного материала, всё же сварка чугуна технологически более сложна относительно малоуглеродистой стали. Трудности сварки высокопрочного чугуна в основном обусловлены повышенной жидкотекучестью сварочной ванны и склонностью к образованию цементита и ледебурита при кристаллизации. При этом сварочная ванна испытывает воздействие как от самой сварочной дуги, так и от внешних физических возмущений. В результате этого на готовом изделии при достаточных механических свойствах возникают такие дефекты, как подрезы, утяжины и другие искажения формы шва. Они являются концентраторами напряжений, которые в процессе эксплуатации могут привести к разрушению сварного соединения по шву или по околовшовной зоне.

Традиционная технология сварки труб из чугуна с шаровидным графитом включает в себя предварительный подогрев изделия до 250...350 °C и сварку в среде аргона неплавящимся электродом с высоконикелевой присадкой. После сварки проводится изотермический отжиг готовых изделий при температуре 950...970 °C с целью разложения метастабильных фаз (цементита, ледебурита, мартенсита) и для снятия внутренних напряжений сварного соединения. Присутствие в структуре ЗТВ игл первичного цементита, ледебурита и создаёт предпосылки для возникновения холодных трещин.

Кроме того, получать сварные соединения, по прочности и пластичности близкие в

высокопрочном чугуне к основному металлу, значительно труднее, чем при сварке серого чугуна, тем более, что магний, вводимый в чугун для получения ВЧШГ, увеличивает его склонность к образованию отбела [2].

Структурная схема сварного соединения ВЧШГ [3] (рис. 1) свидетельствует, что самыми опасными зонами являются зоны 2а и 2б.

Зоны сварного соединения имеют следующие структурные превращения:

1 - металл шва (аустенит с мелкими включениями шаровидного графита);

2а - зона сплавления со стороны металла шва (аустенит, ледебурит непревращённый, мартенсит);

2б - зона сплавления со стороны основного металла (ледебурит превращённый, первичный цементит и структуру закалки – мартенсит и троостит);

3 - зона термического влияния (структуря меняется от чисто перлитной до ферритной);

4 - основной металл (ферритная основа с шаровидным графитом).

Различие структур объясняется тем, что температура, скорости нагрева и охлаждения отдельных участков ЗТВ при сварке неодинаковы, поэтому структурные превращения в каждом участке этой зоны и их конечные структуры различны.

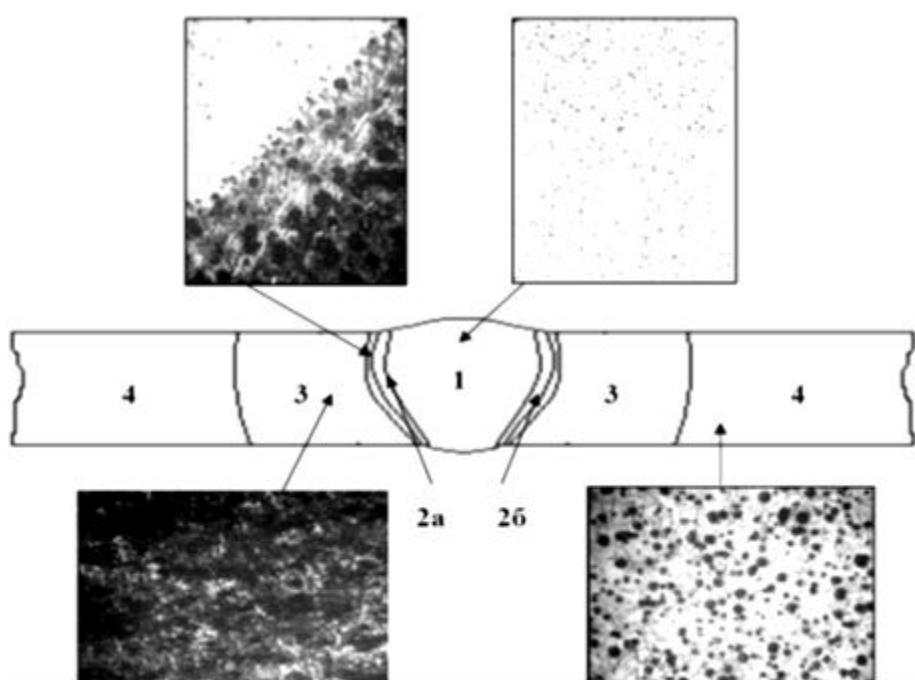


Рисунок 1- Структура соединения труб из ВЧШГ аргонодуговой сваркой стационарной дугой без последующей термической обработки [2]: 1 – металл шва; 2а – зона сплавления со стороны металла шва; 2б – зона сплавления со стороны основного металла; 3 – зона термического влияния; 4 – основной металл

Изучение современных и прогрессивных технологий сварки показало, что способы сварки стационарной дугой, практически исчерпали свои возможности и перспективным направлением повышения качества сварных соединений из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом является применение импульсных сварочных технологий, и в частности импульсной аргонодуговой сварки. Эти процессы с использованием современных

импульсных источников питания позволяют регулировать тепловложение при сварке по заданной программе.

В РК на заводе «Сварко» освоено производство инверторных источников питания сварочной дуги ТИГ-315, позволяющих вести сварку в непрерывном режиме стационарной дугой и в импульсном режиме тока различной величины и длительности. При переходе к процессу на импульсных режимах появляется возможность дозированного введения тепловой энергии при сварке высокопрочного чугуна. Это позволяет снизить тепловложения в свариваемый металл и управлять жидкотекучестью сварочной ванны во времени в программируемом режиме.

В данной работе исследовано влияние режимов импульсной сварки ТIG на структуру и механические свойства стыковых сварных соединений труб из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом ВЧ-50.

Для получения сварных соединений были использованы технологии ручной аргонодуговой сварки на постоянном токе стационарной дугой и в импульсно-дуговом режиме сварки с использованием осциллятора для возбуждения дуги. Угол заточки вольфрамового электрода принят равным 15 градусов при его вылете  $7\pm1$  мм. В качестве присадки использовали проволоку ПАНЧ 11 диаметром 1,2 мм.

Металлографические исследования проводили на микроскопе Neofot. Травление шлифов осуществлялось в 3 % растворе азотной кислоты, в травителях на основе соляной и серной кислот в соответствии с рекомендациями работ [4].

Режимы сварки образцов приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1  
*Режимы сварки стыкового соединения стационарной дугой*

Сварочный ток, А	Напряжение, В	Скорость сварки, см/с	Диаметр присадки, мм	Диаметр вольфр. электрода, мм	Дуговой промежуток, мм
50	12	1,22	1,2	3,0	4,0

Таблица 2  
*Режимы сварки стыкового соединения в импульсном режиме*

Ток импульса, А	Ток паузы, А	Напряжение импульса, В	Напряжение паузы, В	Время импульса, с	Время паузы, с	Диаметр присадки, мм	Диаметр электрода, мм	Дуговой промежуток, мм
60	40	8	10	0,55	0,30	1,2	3,0	4,0

При сварке на импульсном режиме присадку подавали в разделку под дугу периодически в момент возникновения тока и времени импульса и прекращали в момент возникновения тока и времени паузы. Это позволило максимально использовать дугу на плавление проволоки и снизить её тепловой эффект на приграничную зону сплавления.

Анализ результатов сравнительных механических испытаний (табл. 3) показал, что прочность сварного соединения, выполненного на импульсном токе, превышает значение прочности соединений, выполненных на постоянном токе стационарной непрерывной ду-

гой на 8...10 %.

Угол загиба сварного соединения, выполненного на импульсном токе, также взрастает в среднем на 1,2...1,3 раза в сравнении с соединениями, выполненными стационарной дугой.

Сравнительные металлографические исследования сварных швов (рис. 2) показывают, что импульсный ток оказывает существенное влияние на снижение ширины зоны сплавления со стороны основного металла. Она характеризуется наличием превращенного ледебурита, первичного цементита и структур закалки мартенсита и троостита и является источником возникновения трещин. Это приводит к уменьшению протяженности относительно твердой и хрупкой зоны и увеличивает прочность изделия.

Таблица 3

*Результаты механических испытаний сварных соединений, выполненных стационарной и пульсирующей дугой*

Толщина образца, мм	Ширина образца, мм	Площадь, $\text{мм}^2$	Нагрузка, кгс	Предел прочности, кгс/мм $^2$	Угол загиба, град
Постоянный ток стационарной дугой					
4	17,0	68	3298	48,55	30
4	17,4	69,6	3461	49,72	39
4	17,7	70,4	3497	49,68	37
Импульсный ток пульсирующей дугой					
4	17,9	71,6	3748	52,35	41
4	18,6	74,48	4076	54,72	44
4	18,8	75,20	4173	55,49	49

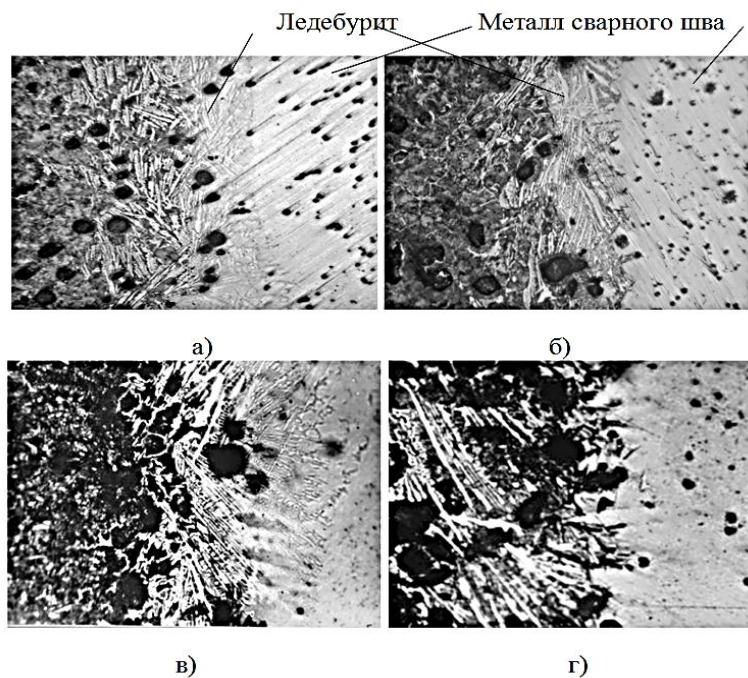


Рисунок 2 - Микроструктура соединений чугуна ВЧШГ при сварке TIG X300: а, в – постоянный по величине ток стационарной дугой; б, г – импульсный ток пульсирующей дугой;  
а, б – без предварительного подогрева постоянный по величине ток стационарной дугой;  
в, г – с предварительным подогревом

Установлено, что ширины опасной зоны при сварке на импульсных режимах (рис. 2,б) снижается в среднем в 1,2 раза в сравнении со сварными швами, выполненными стационарной непрерывной дугой на тех же режимах (рис. 2,а). Это свидетельствует о том, что при сварке на импульсных режимах снижается объёмное тепловложение в металле. При этом создаются оптимальные условия для направленной ускоренной кристаллизации металла сварочной ванны чугуна с повышенной жидкотекучестью.

Импульсы высокого напряжения быстро обеспечивают глубину расплавления основного металла, но не вызывают интенсивного разогрева материала. Фоновый ток при этом поддерживает нужное состояние дуги между импульсами. По сравнению с постоянной дугой, пульсирующая дуга усиливает проникновение, не повышая температуру соединения.

#### Список литературы

1. Ветер В.В. Перспектива строительства трубопроводов горячего водоснабжения и отопительных сетей из чугунных труб с шаровидным графитом / В.В. Ветер и др. // Новости теплоснабжения. – 2002. – № 5 (21).
2. Лебедев В.С. Металлургические особенности сварочной ванны на высоко прочном чугуне с шаровидным графитом // Современная металлургия начала нового тысячелетия: Сб. научн. тр. – Липецк: ЛГТУ, 2010. – С. 29-31.
3. Расчетно-экспериментальная оценка ресурса сварных соединений трубопроводов из ЧШГ для условий механического нагружения. Свойства и ресурс сварных соединений / Ф.А. Хромченко, В.А. Лаппа, В.В. Ветер и др. // Сварочное производство. – 2000. – Ч. 2. – № 7.
4. Бунин К.П. Основы металлографии чугуна / К.П. Бунин, Я.Н. Малиnochka, Ю.Н. Таран. – Москва: Металлургия, 1969. – 416 с.

Получено 20.05.2016



## ВЕТРОДВИГАТЕЛИ МЕШАЮТ ДРУГ ДРУГУ

До сих пор считалось, что ветер может давать семь ватт электроэнергии с квадратного метра. Однако исследование, проведенное немецкими физиками и инженерами на «ветровой ферме» в Канзасе (США), показало, что этот комплекс из десятков ветровых электрогенераторов дает не более 1,1 ватта на квадратный метр. Дело в том, что ветряки перехватывают потоки воздуха у соседей и тормозят ветер.

«Наука и жизнь» № 3, 2016

**ISSN**

**1561-4212.**

**«ВЕСТНИК**

**107 ВКГТУ»**

**№**

**2,**

**2016.**

---

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**