



УДК 539.3/6:519.863

**Б.М. Абдеев, Г.А. Гурьянов, Е.А. Клименко**  
ВКГТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск**ПРЯМОЙ СТУПЕНЧАТЫЙ ВАЛ НА ДВУХ ОПОРАХ,  
ИМЕЮЩИЙ МИНИМАЛЬНУЮ МАТЕРИАЛОЁМКОСТЬ**

Современное машиноведение и строительство, существенно обогатившиеся за последние десятилетия фундаментальными достижениями в области физики, механики, электроники и вычислительной техники, определили направление и теоретическую базу создания высоконадёжных машин, механизмов и конструкций при минимальной их энерго- и материалоемкости [1]. Именно этими причинами и объясняется стремительное развитие в настоящее время экономико-математических методов для расчёта оптимальных технических систем, удовлетворяющих условиям прочности, жёсткости и устойчивости [1-4]. Библиография по данному прогрессивному научному направлению, лежащему на стыке механики деформируемого твёрдого тела [4] и теории оптимального управления [1, 3], насчитывает сотни наименований и поэтому не случаен повышенный интерес инженеров-проектировщиков и математиков к актуальной проблемной тематике, связанной с решением прикладных экстремальных задач [2, 7, 8].

В машиностроении, авиации, судостроении и приборостроении наибольшее распространение получили прямолинейные стальные валы в форме тел вращения, передающие не только крутящие моменты (торсионные валы-рессоры), но и радиальные поперечные нагрузки [5]. При этом гладкие валы часто заменяют ступенчатыми по эксплуатационно-технологическим и экономическим соображениям.

В представленной статье рассматривается двухопорный ступенчатый вал длиной  $L$  с двумя насадками, которые могут комбинироваться из прямозубых шестерней и шкивов, а его три участка имеют линейные размеры  $l_1, l_2, l_3$  и постоянные диаметры  $d_1 = const, d_2 = const, d_3 = const$  (рис. 1).

При математическом описании моделируемой конструкции вводим общепринятые допущения [4, 5]: а) об однородности, изотропности и линейной упругости материала; б) о пренебрежении влиянием собственного веса вала, внутренними поперечными силами и галтелями, уменьшающими концентрацию напряжений в сечениях «С» и «Д» с резким («скачкообразным») изменением диаметров.

Считая заданными проектными характеристиками: допускаемое нормальное напряжение материала  $[\sigma]$ ; общую длину бруса  $L$  и размер

$$l_3 = k_l \cdot L \quad (1)$$

при  $0 < k_l < 1$ , а также конкретную схему передачи на ось вала известных внешних крутящих моментов  $M_{кв}$  и поперечных сосредоточенных сил в местах установки насадок  $O_1, O_2$ , требуется:

- отрегулировать моделируемую систему таким образом, чтобы наибольший приведённый момент  $M_{IV}$  по гипотезе пластичности Губера-Генки-Мизеса (четвёртой теории прочности [5, 6]) был минимальным, то есть

$$M_{IV}^{(\max)} = \min, \quad (2)$$

при фиксированном соотношении между  $M_{\kappa\theta}$  и экстремальным результирующим изгибающим моментом  $M_{\max}$  [4, 6]

$$M_{\kappa\theta} = \kappa \cdot M_{\max} = \kappa \cdot \sqrt{M_z^2 + M_y^2}, \quad \kappa > 0, \quad (3)$$

где  $M_z$ ,  $M_y$  – изгибающие моменты относительно оси  $z$  в вертикальной плоскости  $xOy$  и по отношению к осевой линии  $y$  координатной системы  $xOz$  (рис. 1);

- подобрать такие стационарные значения

$$x_{01} = \frac{d_{01}}{d_{03}}, \quad x_{02} = \frac{d_{02}}{d_{03}}, \quad d_{03} = x_{03}, \quad y_{01} = \frac{b_{01}}{l_{01}}, \quad y_{02} = \frac{b_{02}}{l_{02}}, \quad z_{01} = \frac{l_{01}}{L}, \quad z_{02} = \frac{l_{02}}{L} \quad (4)$$

переменных

$$x_1 = \frac{d_1}{d_3}, \quad x_2 = \frac{d_2}{d_3}, \quad x_3 = d_3 > 0, \quad y_1 = \frac{b_1}{l_1}, \quad y_2 = \frac{b_2}{l_2}, \quad z_1 = \frac{l_1}{L}, \quad z_2 = \frac{l_2}{L}, \quad (5)$$

$$(0 \leq x_1 \leq 1, 0 \leq x_2 \leq 1, 0 \leq y_1 \leq 1, 0 \leq y_2 \leq 1, 0 \leq z_1 \leq 1-\kappa_1, 0 \leq z_2 \leq 1-\kappa_1),$$

которые соответствуют наименьшему объёму

$$V_{\min} = V(x_{01}, x_{02}, x_{03}, y_{01}, y_{02}, z_{01}, z_{02}) \quad (6)$$

целевой функции [7-9]

$$V = V(x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, z_1, z_2) \quad (7)$$

при реализации уравнений связи, наряду с (2), в виде условий равной прочности

$$\sigma_{IV}^{(C)} = \sigma_{IV}^{(O_1)} \equiv \sigma_{IV}^{(\max)} = [\sigma], \quad (8)$$

$$\sigma_{IV}^{(D)} = \sigma_{IV}^{(O_2)} \equiv \sigma_{IV}^{(\max)} = [\sigma] \quad (9)$$

по эквивалентным напряжениям  $\sigma_{IV}$  [4, 6, 7] для сечений «C», «D», «O<sub>1</sub>», «O<sub>2</sub>» моделируемой конструкции и соблюдения очевидного геометрического соотношения (рис. 1)

$$l_1 + l_2 + l_3 = L, \quad (10)$$

или, учитывая (1) и обозначения (5),

$$z_1 = 1 - \kappa_l - z_2. \quad (11)$$

Решая сформулированную экстремальную задачу [8], следует заметить, что при использовании формулы (3) и вследствие постоянства эпюры внутреннего крутящего момента

$$M_{\kappa} = M_{\kappa\theta} = \text{const} \quad (12)$$

на участке вала  $O_1O_2$ , где  $d_3 = \text{const}$  (рис. 1), выполнение условия (2), имеющего вид [5, 6]

$$M_{IV}^{(\max)} = \sqrt{M_{\max}^2 + 0,75 \cdot M_{\kappa}^2} = M_{\max} \cdot \sqrt{1 + 0,75 \cdot \kappa^2} = \min, \quad (13)$$

равносильно равенству результирующих моментов

$$M_{01} = M_{02} \Rightarrow M_{\max} = \min \quad (14)$$

в равноопасных точках «O<sub>1</sub>» и «O<sub>2</sub>» оси  $x$  бруса, положение которых регламентируется оптимизацией параметров  $z_1$  и  $z_2$ .

Для большей наглядности и лучшей интерпретации дальнейших теоретических выкладок конкретизируем план сил (рис. 2), задавшись численными значениями коэффициентов:

$$\kappa = 0,7; \quad \kappa_l = 0,4. \quad (15)$$

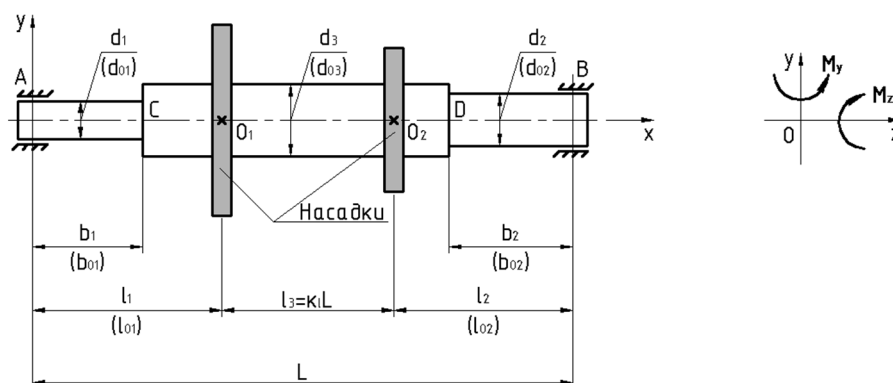


Рисунок 1 – Расчётно-конструктивная схематизация вала

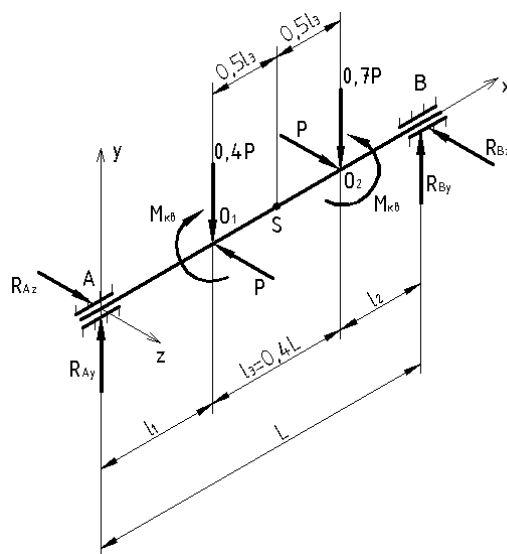


Рисунок 2 – Пример пространственной расчётной модели конструкции вала с дополнительной точкой «S» и произвольным силовым параметром P

В абсолютных величинах формула целевого функционального критерия (7) объёма  $V$  материала конструкции выглядит следующим образом:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \cdot b_1 + \frac{\pi \cdot d_3^2}{4} \cdot (l_1 - b_1) + \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \cdot b_2 + \frac{\pi \cdot d_3^2}{4} \cdot (l_2 - b_2) + \frac{\pi \cdot d_3^2}{4} \cdot l_3, \quad (16)$$

где  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  – объёмы элементов вала,

$$V_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \cdot b_1 + \frac{\pi \cdot d_3^2}{4} \cdot (l_1 - b_1), \quad (17)$$

$$V_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \cdot b_2 + \frac{\pi \cdot d_3^2}{4} \cdot (l_2 - b_2), \quad (18)$$

$$V_3 = \frac{\pi \cdot d_3^2}{4} \cdot l_3 \quad (19)$$

длиной, соответственно (рис. 1 и 2),  $l_1$ ,  $l_2$  и

$$l_3 = \kappa_i \cdot L = 0,4 \cdot L. \quad (20)$$

Трансформируя выражения (16)-(19) путём введения варьируемых аргументов (5) и подстановки (20), получаем:

$$V_1 = \frac{\pi}{4} \cdot L \cdot x_3^2 \cdot z_1 \cdot (1 - y_1 + x_1^2 \cdot y_1), \quad 0 \leq z_1 \leq 0,6; \quad (21)$$

$$V_2 = \frac{\pi}{4} \cdot L \cdot x_3^2 \cdot z_2 \cdot (1 - y_2 + x_2^2 \cdot y_2), \quad 0 \leq z_1 \leq 0,6; \quad (22)$$

$$V_3 = 0,4 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot x_3^2 \cdot L; \quad (23)$$

$$V = V_1 + V_2 + V_3. \quad (24)$$

Последующее математическое описание оптимизационного процесса осуществляем в применении к модели рис. 2. Соответствующие этапы дальнейшего решения задачи, включающие некоторые дополнительные вычислительные процедуры, пронумеруем:

1. Опорные реакции  $R_{Ay}$ ,  $R_{By}$ ,  $R_{Az}$ ,  $R_{Bz}$  в зависимости от  $z_2$ , при соблюдении условий (11) и (20), которые находим из уравнений равновесия в горизонтальной и вертикальной плоскостях  $xOy$ ,  $xOz$  (рис. 2):

$$R_{Ay} = P \cdot (0,16 + 1,1 \cdot z_2), \quad R_{By} = P \cdot (0,94 - 1,1 \cdot z_2); \quad (25)$$

$$R_{Az} = R_{Bz} = 0,4 \cdot P. \quad (26)$$

2. Функции изгибающих  $M_{z01}$ ,  $M_{z02}$ ,  $M_{y01}$ ,  $M_{y02}$  и результирующих  $M_{01}$ ,  $M_{02}$  моментов для сечений « $O_1$ », « $O_2$ » вала (рис. 1, 2) [5, 6]:

$$M_{z01} = R_{Ay} \cdot L \cdot \left(\frac{l_1}{L}\right) = R_{Ay} \cdot L \cdot z_1 = P \cdot L \cdot (0,16 + 1,1 \cdot z_2) \cdot (0,6 - z_2); \quad (27)$$

$$M_{z02} = R_{By} \cdot L \cdot \left(\frac{l_2}{L}\right) = R_{By} \cdot L \cdot z_2 = P \cdot L \cdot (0,94 - 1,1 \cdot z_2) \cdot z_2; \quad (28)$$

$$M_{y01} = -R_{Az} \cdot L \cdot \left(\frac{l_1}{L}\right) = -R_{Az} \cdot L \cdot z_1 = -0,4 \cdot P \cdot L \cdot (0,6 - z_2); \quad (29)$$

$$M_{y02} = R_{Bz} \cdot L \cdot \left(\frac{l_2}{L}\right) = R_{Bz} \cdot L \cdot z_2 = 0,4 \cdot P \cdot L \cdot z_2; \quad (30)$$

$$M_{01} = M_{01}(z_2) = \sqrt{M_{z01}^2 + M_{y01}^2} = P \cdot L \cdot (0,6 - z_2) \cdot \sqrt{(0,16 + 1,1 \cdot z_2)^2 + 0,16}; \quad (31)$$

$$M_{02} = M_{02}(z_2) = \sqrt{M_{z02}^2 + M_{y02}^2} = P \cdot L \cdot z_2 \cdot \sqrt{(0,94 - 1,1 \cdot z_2)^2 + 0,16}; \quad (32)$$

где переменная  $z_1$  с учётом (11) и (15) заменена соотношением

$$z_1 = 0,6 - z_2. \quad (33)$$

3. Определение стационарных (оптимальных) численных значений отношений  $l_{02} \cdot L^{-1} = z_{02}$ ,  $l_{01} \cdot L^{-1} = z_{01}$  согласно уравнениям связи (14), (33) и формулам (31), (32):

$$(0,6 - z_{02}) \cdot \sqrt{(0,16 + 1,1 \cdot z_{02})^2 + 0,16} = z_{02} \cdot \sqrt{(0,94 - 1,1 \cdot z_{02})^2 + 0,16}, \quad (34)$$

откуда (методом подбора)

$$z_{02} = \frac{l_{02}}{L} = 0,265, \quad (35)$$

и далее из зависимости (33) следует

$$z_{01} = \frac{l_{01}}{L} = 0,335. \quad (36)$$

Найденная величина (35), при подстановке в (3), (13), (14), (31), (32) с учётом  $\kappa = 0,7$  и  $\kappa_l = 0,4$  (см. (15)), адекватна:

$$M_{\max} = M_{01}(z_{02}) = M_{02}(z_{02}) = 0,202 \cdot P \cdot L; \quad (37)$$

$$M_{\kappa} = M_{\kappa 6} = 0,7 \cdot M_{\max} = 0,1414 \cdot P \cdot L; \quad (38)$$

$$M_{IV}^{(\max)} = M_{\max} \cdot \sqrt{1 + 0,75 \cdot (0,7)^2} = 0,2362 \cdot P \cdot L. \quad (39)$$

Графическая иллюстрация решения (35), (37) нелинейного алгебраического уравнения (34) показана на рис. 3 безразмерными функциональными зависимостями:

$$M_{01}^* = M_{01}^*(z_2) = M_{01} \cdot (P \cdot L)^{-1}, \quad M_{02}^* = M_{02}^*(z_2) = M_{02} \cdot (P \cdot L)^{-1} \quad (40)$$

с использованием выражений (31), (32) и численных данных таблицы 1.

4. Моментные силовые факторы  $M_{zs}$ ,  $M_{ys}$ ,  $M_s$ ,  $M_{IV}^{(S)}$  в сечении «S» расчётной схемы (рис. 2) и отрегулированные эпюры  $M_{\kappa}$ ,  $M$ ,  $M_{IV}$  (рис. 4).

Учитывая (20), (25), (26), (35), (36), определяем (рис. 2):

$$M_{zs} = R_{Ay} \cdot (l_{01} + 0,5 \cdot l_3) - 0,4 \cdot P \cdot 0,5 \cdot l_3 = 0,16155 \cdot P \cdot L, \quad (41)$$

$$M_{ys} = -R_{Az} \cdot (l_{01} + 0,5 \cdot l_3) + P \cdot 0,5 \cdot l_3 = -0,014 \cdot P \cdot L; \quad (42)$$

$$M_s = \sqrt{M_{zs}^2 + M_{ys}^2} = P \cdot L \cdot \sqrt{(0,16155)^2 + (0,014)^2} = 0,16216 \cdot P \cdot L, \quad (43)$$

$$M_{IV}^{(S)} = \sqrt{M_s^2 + 0,75 \cdot M_{\kappa}^2} = P \cdot L \cdot \sqrt{(0,16216)^2 + (0,1414)^2} = 0,2032 \cdot P \cdot L. \quad (44)$$

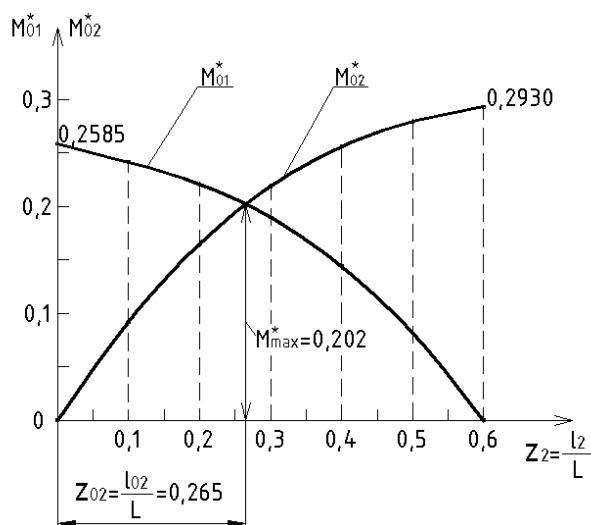


Рисунок 3 – Графики функций (40)

Таблица 1

$z_2 = \frac{l_2}{L}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$M_{01}^*$	0,2585	0,2413	0,2207	0,1898	0,1442	0,0815	0

$M_{02}^*$	0	0,0921	0,1647	0,2188	0,2561	0,2793	0,2930
------------	---	--------	--------	--------	--------	--------	--------

5. Реактивные силы  $R_{oAy}$ ,  $R_{oBy}$  оптимизированной модели конструкции (рис. 2) и аналитические выражения для изгибающих  $M_{zc}$ ,  $M_{yc}$ ,  $M_{zD}$ ,  $M_{yD}$ ,  $M_c$ ,  $M_D$  и приведённых  $M_{IV}^{(c)}$ ,  $M_{IV}^{(D)}$  моментов, действующих в сечениях «С» и «D» ступенчатого вала (рис. 1).

Руководствуясь общими соотношениями (25), после замены  $z_2 \Rightarrow z_{02} = 0,265$ , согласно (35), а также формулами (4), (5), (26), (36), эпюрами (рис. 4) и справочными зависимостями [5, 6], находим:

$$\left. \begin{aligned} R_{oAy} &= P \cdot (0,16 + 1,1 \cdot 0,265) = 0,4515 \cdot P, \\ R_{oBy} &= P \cdot (0,94 - 1,1 \cdot 0,265) = 0,6485 \cdot P; \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{zc} &= R_{oAy} \cdot b_1 = 0,4515 \cdot P \cdot b_1, \\ M_{yc} &= R_{Az} \cdot b_1 = 0,4 \cdot P \cdot b_1. \end{aligned} \right\} \quad (46)$$

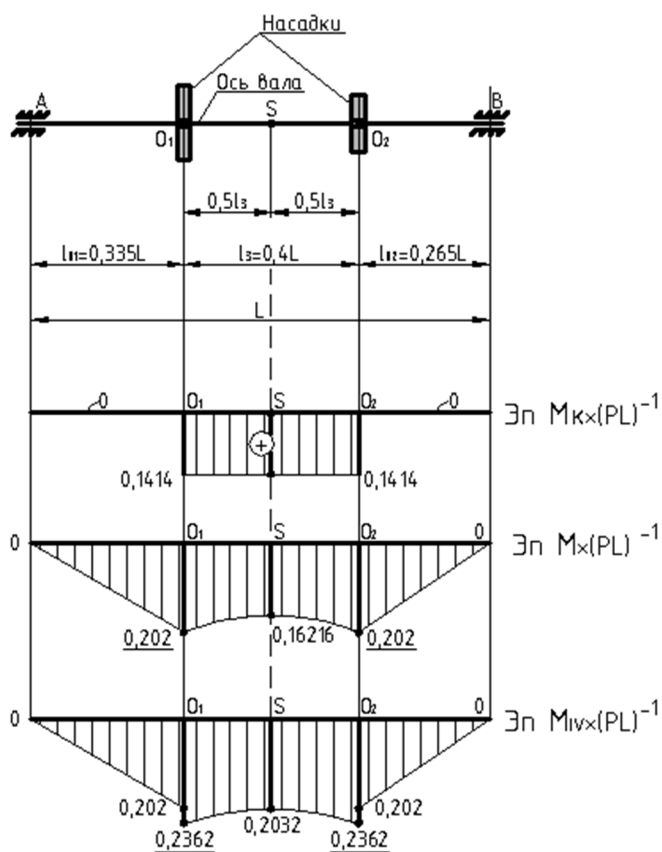


Рисунок 4 – Эпюры моментов  $M_k$ ,  $M$  и  $M_{IV}$ , соответствующие найденным параметрам (35)-(39), (43), (44)

$$\left. \begin{aligned} M_{zD} &= R_{oBy} \cdot b_2 = 0,6485 \cdot P \cdot b_2, \\ M_{yD} &= R_{Bz} \cdot b_2 = 0,4 \cdot P \cdot b_2; \end{aligned} \right\} \quad (47)$$

$$\left. \begin{aligned} M_c &= \sqrt{M_{zc}^2 + M_{yc}^2} = P \cdot b_1 \cdot \sqrt{(0,4515)^2 + (0,4)^2} = 0,6032 \cdot P \cdot b_1, \\ M_D &= \sqrt{M_{zD}^2 + M_{yD}^2} = P \cdot b_2 \cdot \sqrt{(0,6485)^2 + (0,4)^2} = 0,7619 \cdot P \cdot b_2; \end{aligned} \right\} \quad (48)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{IV}^{(c)} &= \sqrt{M_c^2 + 0,75 \cdot M_\kappa^2} = M_c = 0,6032 \cdot P \cdot b_1 = 0,6032 \cdot P \cdot l_{01} \cdot y_1 = \\ &= 0,6032 \cdot P \cdot 0,335 \cdot L \cdot y_1 = 0,20207 \cdot P \cdot L \cdot y_1, \\ M_{IV}^{(D)} &= \sqrt{M_D^2 + 0,75 \cdot M_\kappa^2} = M_D = 0,7619 \cdot P \cdot b_2 = 0,7619 \cdot P \cdot l_{02} \cdot y_2 = \\ &= 0,7619 \cdot P \cdot 0,265 \cdot L \cdot y_2 = 0,2019 \cdot P \cdot L \cdot y_2. \end{aligned} \right\} \quad (49)$$

6. Раскрытие условий равнопрочности (8), (9), основываясь на справочной информации [5, 6] и соотношениях (4), (5), (39), (49):

$$\sigma_{IV}^{(\max)} = \frac{32 \cdot M_{IV}^{(\max)}}{\pi \cdot d_{03}^3} = \frac{32 \cdot 0,2362 \cdot P \cdot L}{\pi \cdot x_{03}^3} = [\sigma], \quad (50)$$

откуда получаем

$$x_{03} = d_{03} = 1,9625 \cdot \sqrt[3]{\frac{P \cdot L}{\pi \cdot [\sigma]}}, \quad (51)$$

и, продолжая этот процесс, будем иметь:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{IV}^{(c)} &= \frac{32 \cdot M_{IV}^{(c)}}{\pi \cdot d_1^3} = \frac{32 \cdot 0,20207 \cdot P \cdot L \cdot y_1}{\pi \cdot x_{03}^3 \cdot x_1^3} = \frac{6,4662 \cdot P \cdot L \cdot y_1}{\pi \cdot x_{03}^3 \cdot x_1^3} = \\ &= \sigma_{IV}^{(\max)} = \frac{32 \cdot M_{IV}^{(\max)}}{\pi \cdot d_{03}^3} = \frac{7,5584 \cdot P \cdot L}{\pi \cdot x_{03}^3}; \end{aligned} \right\} \quad (52)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{IV}^{(D)} &= \frac{32 \cdot M_{IV}^{(D)}}{\pi \cdot d_2^3} = \frac{32 \cdot 0,2019 \cdot P \cdot L \cdot y_2}{\pi \cdot x_{03}^3 \cdot x_2^3} = \frac{6,4608 \cdot P \cdot L \cdot y_2}{\pi \cdot x_{03}^3 \cdot x_2^3} = \\ &= \sigma_{IV}^{(\max)} = \frac{7,5584 \cdot P \cdot L}{\pi \cdot x_{03}^3}. \end{aligned} \right\} \quad (53)$$

Из равенства подчеркнутых членов в зависимостях (52) и (53) находим:

$$y_1 = 1,1689 \cdot x_1^3; \quad y_2 = 1,1699 \cdot x_2^3. \quad (54)$$

7. Преобразование целевого критерия (24) в безразмерную алгебраическую сумму двух независимых функций  $V_1^* = V_1^*(x_1)$ ,  $V_2^* = V_2^*(x_2)$  и постоянной величины  $V_{03}^* = V_{03}^*(x_{03}) = const$ .

Проведя замены  $V_3 \Rightarrow V_{03}$ ,  $x_3 \Rightarrow x_{03}$  при подстановке в формулы (21)-(24) переменных  $y_1$ ,  $y_2$  и оптимальных параметров  $z_{01}$ ,  $z_{02}$ , с учётом уже известного стационарного значения  $x_{03} = const$  (см. (51)), получаем следующие выражения:

$$V_1^* = V_1^*(x_1) = V_1 \cdot 4 \cdot (\pi \cdot L \cdot x_{03}^2)^{-1} = 0,335 \cdot [1 - 1,1689 \cdot (x_1^3 - x_1^5)], \quad 0 \leq x_1 \leq 1; \quad (55)$$

$$V_2^* = V_2^*(x_2) = V_2 \cdot 4 \cdot (\pi \cdot L \cdot x_{03}^2)^{-1} = 0,265 \cdot [1 - 1,1699 \cdot (x_2^3 - x_2^5)], \quad 0 \leq x_2 \leq 1; \quad (56)$$

$$V_{03}^* = V_{03} \cdot 4 \cdot (\pi \cdot L \cdot x_{03}^2)^{-1} = 0,4; \quad (57)$$

$$V^* = V^*(x_1, x_2) = V_1^* + V_2^* + V_{03}^* = V_1^* + V_2^* + 0,4. \quad (58)$$

8. Определение абсолютного минимума  $V_{\min}^*$  функциональной целевой зависимости (58), учитывая её структурные особенности (55)-(57):

а) необходимые условия для  $V_{\min}^*$  [8 – 10]:

$$\frac{\partial V^*}{\partial x_1} \equiv \left[ \frac{dV_1^*}{dx_1} \right]_{x_1=x_{01}} = 0,39158 \cdot x_{01}^2 \cdot (5 \cdot x_{01}^2 - 3) = 0, \quad (59)$$

$$\frac{\partial V^*}{\partial x_2} \equiv \left[ \frac{dV_2^*}{dx_2} \right]_{x_2=x_{02}} = 0,31 \cdot x_{02}^2 \cdot (5 \cdot x_{02}^2 - 3) = 0, \quad (60)$$

которые представляют собой два алгебраических уравнения, имеющих по одному положительному корню

$$x_{01} = x_{02} = x_0 = \sqrt{\frac{3}{5}} = 0,7746; \quad (61)$$

б) достаточный признак, подтверждающий наличие  $V_{\min}^*$ , когда  $x_1 = x_{01}$  и  $x_2 = x_{02}$ , следует при безусловном соблюдении двух неравенств [8, 10]:

$$\frac{\partial^2 V^*}{\partial x_1^2} \equiv \left[ \frac{d^2 V_1^*}{dx_1^2} \right]_{x_1=x_0} = 0,39158 \cdot 2 \cdot x_0 \cdot (10 \cdot x_0^2 - 3) = 1,8199 > 0, \quad (62)$$

$$\frac{\partial^2 V^*}{\partial x_2^2} \equiv \left[ \frac{d^2 V_2^*}{dx_2^2} \right]_{x_2=x_0} = 0,31 \cdot 2 \cdot x_0 \cdot (10 \cdot x_0^2 - 3) = 1,4408 > 0. \quad (63)$$

Подстановка (61) в (55), (56) и (58) приводит к искомому экстремуму  $V_{\min}^*$ :

$$V_{1\min}^* = V_1^*(x_0) = 0,2622; \quad V_{2\min}^* = V_2^*(x_0) = 0,2074; \quad (64)$$

$$V_{\min}^* = V_{1\min}^* + V_{2\min}^* + 0,4 = 0,8696. \quad (65)$$

Можно отметить в этой связи, что для отрегулированной модели (рис. 1; 4) с одинаковыми диаметрами  $d_1 = d_2 = d = d_{03} = x_{03}$ , у которой  $y_1 = y_2 = x_1 = x_2 = 1$ , расчётный объём  $V^*$  по формулам (55)-(58) будет равен

$$V^* = V^*(1;1) = 0,335 + 0,265 + 0,4 = 1, \quad (66)$$

что больше  $V_{\min}^* = 0,8696$ , согласно (65). Иными словами конструкция, имеющая  $d = const$  по всей длине  $L$ , тяжелее и менее экономична ступенчатого (рационального) вала на 17,25 %.

Полученные зависимости (55), (56), (58) и количественные данные (61), (64), (65) наглядно проинтерпретированы соответствующими кривыми (рис. 5) и численной информацией (табл. 2).

С практической точки зрения решение проблемы минимизации массы механической системы, в том числе вала или оси, является актуальной и перспективной комплексной фундаментально прикладной задачей для любого современного инженера-конструктора.



По этой причине, завершая данную статью, приводим формульный алгоритм определения проектных параметров  $l_{01}$ ,  $l_{02}$ ,  $d_{01}$ ,  $d_{02}$ ,  $d_{03}$ ,  $b_{01}$ ,  $b_{02}$ ,  $V_{min}$  (рис. 1), базируясь на соотношениях (4) и найденных оптимальных константах (35), (36), (51), (54), (61), (65) для частного случая расчётной схемы детали с коэффициентами (15) (рис. 2):

$$\bullet \Rightarrow l_{01} = z_{01} \cdot L = 0,335 \cdot L; \quad l_{02} = z_{02} \cdot L = 0,265 \cdot L; \quad (67)$$

$$\bullet \Rightarrow d_{03} = 1,9625 \cdot \sqrt[3]{P \cdot L \cdot (\pi \cdot [\sigma])^{-1}}; \quad d_{01} = d_{02} = d_0 = x_0 \cdot d_{03} = 0,7746 \cdot d_{03}; \quad (68)$$

$$\bullet \Rightarrow b_{01} = y_{01} \cdot l_{01} = 1,1689 \cdot x_0^3 \cdot 0,335 \cdot L = 0,182 \cdot L; \quad (69)$$

$$\bullet \Rightarrow b_{02} = y_{02} \cdot l_{02} = 1,1699 \cdot x_0^3 \cdot 0,265 \cdot L = 0,144 \cdot L; \quad (70)$$

$$\bullet \Rightarrow V_{min} = V_{min}^* \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot L \cdot x_{03}^2 = 0,683 \cdot L \cdot d_{03}^2. \quad (71)$$

В заключение хотелось бы также уточнить, что для упругих стальных валов, деформирующихся в пределах закона Гука [4-6], допускаемое напряжение

$$[\sigma] = \sigma_m \cdot [n]^{-1}, \quad (72)$$

где  $\sigma_m$  – предел текучести материала;  $[n] = 1,2 \div 1,8$  – нормативный или минимально допустимый коэффициент запаса прочности [5].

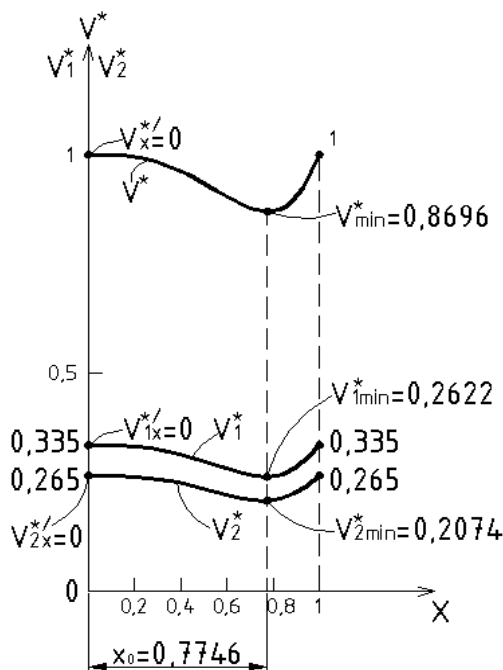


Рисунок 5 – Графическая иллюстрация функциональных аппроксимаций

$V_1^*(x_1)$ ,  $V_2^*(x_2)$  и  $V^*(x_1, x_2)$  при  $x_1 = x_2 = x$  ( $0 \leq x \leq 1$ ).

Таблица 2

$x_1 = x_2 = x$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$V_1^*$	0,335	0,332	0,314	0,281	0,263	0,335

$V_2^*$	0,265	0,263	0,248	0,222	0,208	0,265
$V^*$	1	0,995	0,962	0,903	0,871	1

Например, в случае конструирования круглого бруса (вала) длиной  $L=100$  см со ступенчато-переменным сечением из легированной стали марки 40X, у которой  $\sigma_m=5000$  кг/см<sup>2</sup>, будем иметь, руководствуясь (20), (67)-(72) при  $[n]=1,6$  и  $P=2000$  кг:

$$[\sigma]=5000 \cdot (1,6)^{-1}=3125 \text{ кг/см}^2; l_3=0,4 \cdot 100 = 40 \text{ см};$$

$$l_{01}=0,335 \cdot 100 = 33,5 \text{ см}; l_{02} = 0,265 \cdot 100 = 26,5 \text{ см};$$

$$d_{03} = 1,9625 \cdot \sqrt[3]{2000 \cdot 100 \cdot (3,14 \cdot 3125)^{-1}} = 5,36 \text{ см};$$

$$d_{01}=d_{02}=d_0=0,7746 \cdot 5,36 = 4,152 \text{ см}; b_{01}=0,182 \cdot 100 = 18,2 \text{ см}; b_{02}=0,144 \cdot 100 = 14,4 \text{ см};$$

$$V_{\min}=0,683 \cdot 100 \cdot (5,36)^2=1962,2 \text{ см}^3.$$

Анализ результатов проведённой научно-исследовательской работы позволяет сделать следующие выводы:

1) поставленная экстремальная задача прикладной механики решена классическим аналитическим способом с использованием необходимого (59);(60) и достаточного (62), (63) признаков, строго доказывающих, что функциональный критерий (24) объёма  $V$ , зависящий от семи переменных (5) и удовлетворяющий пяти уравнениям связи (33), (34), (51), (54), действительно имеет относительный минимум  $V_{\min}$ ;

2) разработанная новая механико-математическая модель процесса оптимизации доведена до расчётных формул (67)-(71) рациональных геометрических характеристик и проиллюстрирована численным примером их определения для стального равнопрочного бруса-вала, обладающего минимальным расходом материала (71);

3) представленную методику оптимального проектирования возможно модифицировать и обобщить применительно к статически определимым осям и валам со ступенчато-изменяющимися диаметрами между опорами, на консолях и по всей длине.

#### Список литературы

1. Фролов К.В. Методы совершенствования машин и современные проблемы машиноведения. – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.
2. 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.
3. Оскар Ланге. Оптимальные решения: Основы программирования / Пер. с польского В.Д. Меникера; Под ред. Н.Ф. Зайцева. – М.: Изд-во «Прогресс», 1967. – 286 с.
4. Филин А.П. Прикладная механика твёрдого деформируемого тела. – М.: Наука, 1975. – Т. 1. – 832 с.
5. Биргер И.А. Расчёт на прочность деталей машин: Справочник /И.А. Биргер, В.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.
6. Любошиц М.И. Справочник по сопротивлению материалов / М.И. Любошиц, Г.М. Ицкович. – Минск: Изд-во «Вышэйшая школа», 1969. – 464 с.
7. Мажид К.И. Оптимальное проектирование конструкций (Majid K.I., Optimum desing of structures). Лондон, 1974 / Пер. с англ. В.И. Дорофеева; Под ред. докт. физ.-мат. наук, проф. Колтунова М.А. – М.: Высшая школа, 1979. – 237 с.
8. Абдеев Б.М. Классические оптимизационные задачи в сопротивлении материалов: Учеб. пособие / Под ред. Ж.О. Кульсеитова. – Усть-Каменогорск: Изд-во ВКГТУ, 2005. – 206 с.
9. Лесин В.И. Основы методов оптимизации / В.И. Лесин, Ю.П. Лисовец. – М.: Изд-во МАИ, 1998. – 344 с.
10. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1962. – 608 с.

Получено 5.03.2013

УДК 69.002.5

**Г.А. Гурьянов, Е.А. Клименко**

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

**ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ПОМОЛА**

Природные материалы, находящиеся в толще земной поверхности, испытывают значительные естественные изменения механических свойств за счёт старения, воздействия воды, давлений, сдвигов и пластических деформаций. Влияние этих факторов на материалы проявляется многообразием их прочностных свойств.

При разрушении материалов наиболее распространены механические способы воздействия, посредством которых наиболее просто достигается разрушение материала до необходимой крупности конечного продукта и требуемая форма частиц. Механические способы отличаются простотой осуществления и возможностью сочетания методов разрушения. Существует много различных конструкций измельчительного оборудования, отличающихся, в основном, схемой реализации того или иного способа разрушения.

Широко используется сочетание способов разрушения в одном измельчительном оборудовании. В конусной дробилке осуществляется раздавливание материала с истиранием о боковые поверхности конусов, а в шаровой мельнице – удар с истиранием и т.п.

Частицы материала разрушаются в результате превышения внешних усилий пределов прочности (предел временного сопротивления) материала. Широко используются способы измельчения, основанные на образовании в частицах остаточной деформации:

- путём раздавливания, когда разрушение происходит вследствие перехода напряжений за пределы прочности материала на сжатие;
- раскалывания при переходе напряжений за пределы прочности материала на растяжение;
- излома при переходе напряжений за пределы прочности материала на изгиб;
- среза в сочетании с изломом при переходе напряжений за пределы прочности на изгиб и сдвиг;
- истирания при переходе касательных напряжений за пределы прочности на сдвиг;
- удара или динамического воздействия, при этом разновидности упругих деформаций здесь остаются теми же (сжатие, растяжение, изгиб, сдвиг) и разрушение происходит при переходе напряжений за пределы прочности материала на сжатие, растяжение, изгиб и сдвиг.

Исследователи в области измельчения материалов принимают, что раскалывание, чистый излом и сдвиг в сочетании с изломом имеют одинаковую природу, при этом относительная прочность пород на сдвиг и изгиб имеет одинаковый порядок (см. табл.).

*Относительная прочность пород при различных видах напряжений, в %*

Материал	Сжатие	Сдвиг	Изгиб	Растяжение
Граниты	100	9	8	2 – 4
Песчаники	100	10 – 12	6 – 20	2 – 5

Известняки	100	15	8 – 10	4 – 10
------------	-----	----	--------	--------

Поэтому в целях упрощения формирования гипотезы измельчения понимают под перечисленными способами один – раскалывание. Это положение позволяет рассматривать четыре основных способа воздействия на материал: раздавливание, раскалывание, истирание и удар.

Способ воздействия на разрушаемый материал выбирается в зависимости от физико-механических свойств материала и от крупности его частиц. Различают твёрдые материалы и менее твёрдые, мягкие, вязкие и упругие. Способность материала к измельчению определяют как реакцию материала на механическое воздействие. Способность противостоять разрушению зависит также от наличия трещин в частицах материала, от структуры материала и формы частиц. Трещиноватость уменьшает сопротивление частиц разрушению. Наибольшее сопротивление оказывают материалы раздавливанию и истиранию, меньшее – изгибу и наименьшее – растяжению (см. табл.).

Необходимые для разрушения частиц материала усилия развиваются в оборудовании, конструкция которого обеспечивает осуществление определённого способа разрушения. В условиях непрерывного процесса в рабочем пространстве измельчителя наблюдаются все вышеуказанные способы разрушения, но всегда превалирует тот способ, для осуществления которого предназначено данное оборудование.

Как правило, среднее и мелкое измельчение осуществляют ударом с истирающими и изгибающими воздействиями. Тонкое измельчение производят ударом с последующим истиранием. Сверхтонкое – за счёт высокоскоростного удара с истиранием.

Целью нашего дальнейшего исследования является тонкое измельчение. Следуя от обратного, покажем, почему некоторые способы не подходят для тонкого измельчения. Раздавливание при помоле осуществить в полной мере будет достаточно сложно, так как мелкодисперсный материал образует демпфирующий слой, который препятствует процессу раздавливания, распределяя возникающие концентрированные усилия по большой площади и, тем самым, значительно уменьшая разрушающие напряжения. Кроме того, при дальнейшем измельчении происходит обратный процесс, и частицы материала под внешним давлением начинают сращиваться друг с другом, образуя укрупнённые частицы, то есть материал начинает не измельчаться, а спрессовываться.

Раскалывание мелкого материала весьма затруднено, можно сказать, даже невозможно, по причине того, что, во-первых, оказать концентрированное точечное или линейное воздействие на мелкую частицу очень сложно, а во-вторых, выступы и впадины на рабочих органах измельчительных машин должны находиться друг от друга на расстояниях меньших, чем размеры измельчаемых частиц.

Таким образом, из всех воздействий остались лишь удар и истирание, то есть способы, которые в настоящее время и реализуются в конструкциях машин для тонкого измельчения. Для того чтобы оценить эффективность использования названных воздействий в разных конструкциях мельниц проведём их сравнительный анализ.

В барабанной мельнице (рис. 1) измельчаемый материал поступает во вращающийся цилиндрический корпус, в котором дополнительно вращается ротор 1 с билами. Материал за счёт центробежных сил прижимается к стенкам корпуса и перемещается в верхнюю часть камеры, где, отражаясь от экрана 5, частично измельчённый материал поступает на быстровращающийся ротор 1, измельчается под действием бил и попадает на отбойную плиту 3, где происходит основной процесс измельчения. Готовый продукт удаляется из камеры аспирационным устройством.

Конструкция мельницы содержит элементы роторной дробилки и элементы барабанной мельницы с отражающим экраном, что в совокупности обеспечивает повышение эффективности измельчения.

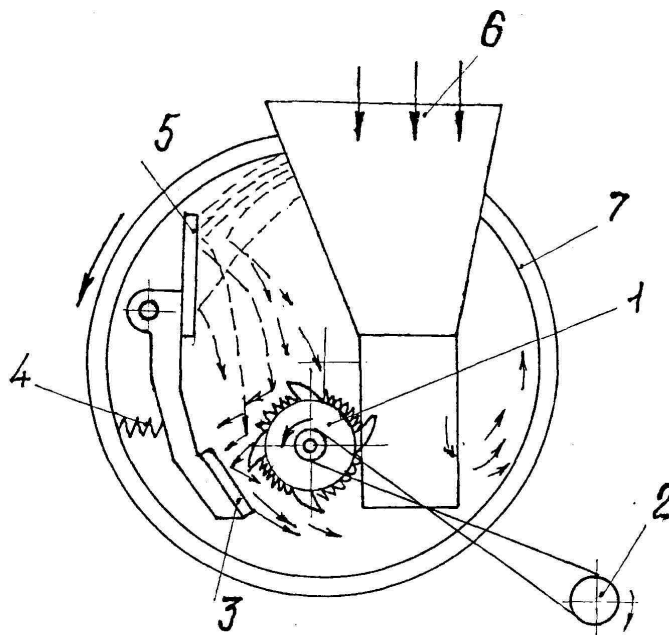


Рисунок 1 – Барабанная мельница: 1 – ротор; 2 – привод ротора; 3 – отбойная плита; 4 – пружина; 5 – экран; 6 – загрузочное приспособление; 7 – корпус

В данной конструкции мельницы реализуется преимущественно ударное воздействие, а истирание носит второстепенный характер и проявляется весьма слабо.

В ударной мельнице (рис. 2) материал попадает в полость камеры. При вращении роторов 5, корпус 1 приводит в движение находящийся в нём материал вместе с роторами 5. Роторы совершают сложное вращательное движение вокруг своей оси и вокруг оси барабана. Материал, поднимаясь вверх в направлении движения корпуса, захватывается ротором 5, измельчается и разбрасывается на подвижные крышки 8, одновременно перемещаясь к верхней критической точке. Не доходя до критической точки крышки 8 переворачиваются, ссылая материал на ротор 5, и провисают до тех пор, пока материал не прижмёт их к стенкам корпуса. Крышки выполняют функции отбойных плит. Доходя до нижней точки, материал вновь попадает под действие роторов. Таким образом, материал с помощью роторов получает большую скорость движения, чем вращающийся ротор, и значительно чаще, по сравнению с шаровой мельницей, подвергается измельчающему воздействию.

В данной конструкции осуществляется, в основном, ударное воздействие бил роторов на материал, а истирание также является слабо проявляющимся второстепенным процессом.

В качестве альтернативы рассмотрим шаровые мельницы, в которых измельчение материала, как принято считать, осуществляется, в основном, с помощью удара и истирания.

В шаровой мельнице (рис. 3) материал загружается в полость барабана. Образовавшаяся смесь шаров 2 и материала поднимается в верхнюю часть барабана, и не доходя до критической точки А, отрывается от поверхности корпуса, падает вниз на поверхность катка 3, который перекачивается по материалу и шарам, и попадает перед катком в точку

В. При ударе материала и тел о каток происходит частичное измельчение материала. Шары и материал попадают под вращающийся каток, подвергаются динамическим ударам и давлению катка, которые разрушают частицы материала.

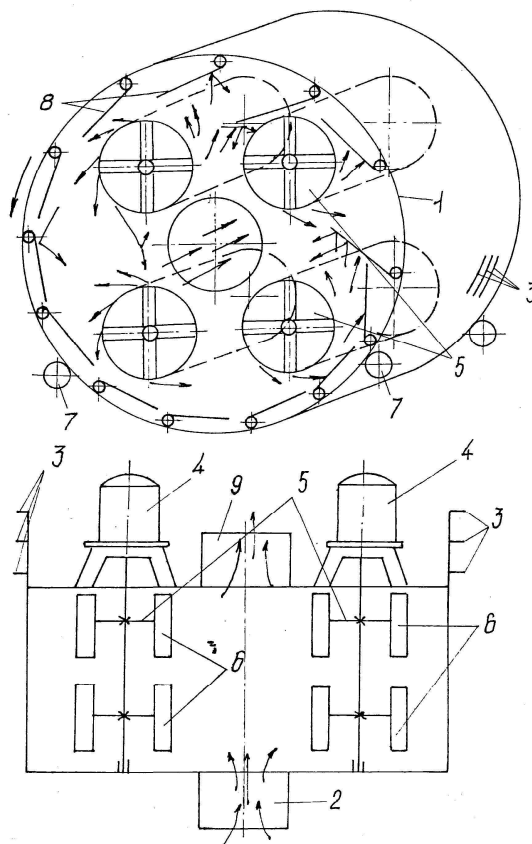


Рисунок 2 – Ударная мельница: 1 – корпус; 2 – загрузочный люк; 3 – токосъёмники; 4 – двигатель; 5 – ротор; 6 – била ротора; 7 – приводной ролик; 8 – подвижные крышки; 9 – разгрузочные люки

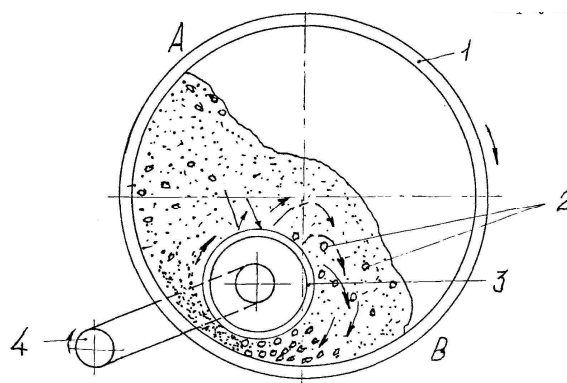


Рисунок 3 – Шаровая мельница: 1 – барабан; 2 – шары; 3 – массивный каток; 4 – привод катка

В этой конструкции ударное измельчение материала происходит только при перемещении загрузки из точки А в точку В под действием сил тяжести, что обуславливает низкую энергонапряжённость процесса, а основное измельчение осуществляется за счёт истирания при воздействии катка. Таким образом, здесь ударное и истирающее воздействия производятся отдельно друг от друга.

Принцип работы барабанной мельницы (рис. 4), заключается в следующем. При пуске мельницы маятник за счёт сил трения покоя отклоняется от вертикальной оси на некоторый угол, по достижению определённого значения угла маятник начинает скользить в сторону первоначального положения. При этом за счёт своего профиля маятник набегает на дробящую загрузку с материалом. В установившемся режиме работы маятник колеблется относительно определённого угла. Он имеет в поперечном сечении профиль, предотвращающий вращение его вокруг своей оси.

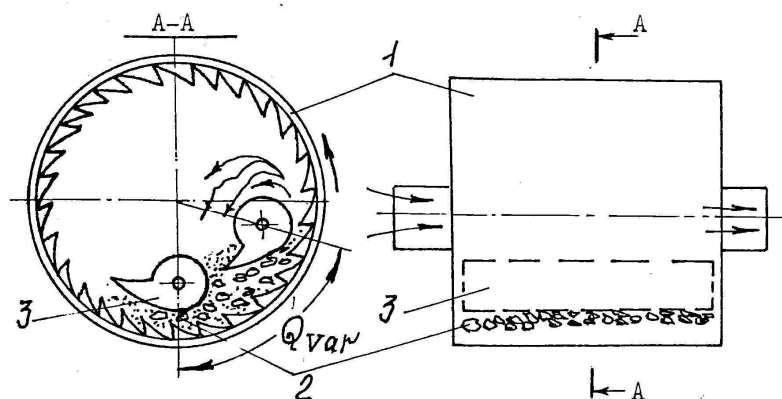


Рисунок 4 – Барабанная мельница: 1 – барабан; 2 – дробящая среда; 3 – массивный маятник

Электромагнитная шаровая мельница (рис. 5) работает следующим образом.

Материал с дробящей средой за счёт сил трения о футеровку барабана движется между футеровкой и рабочей поверхностью маятника, имеющего соответствующий угол захвата, испытывая при этом значительное статическое давление.

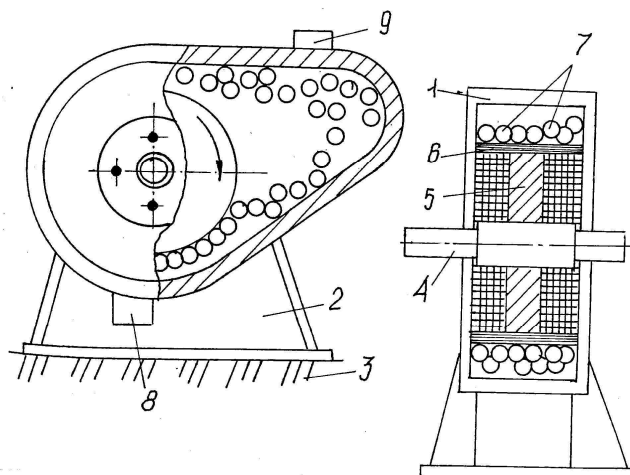


Рисунок 5 – Электромагнитная шаровая мельница: 1 – камера; 2 – рама; 3 – фундамент;  
4 – вал; 5 – якорь; 6 – броня; 7 – шары; 8, 9 – разгрузочный и загрузочный люки

В этой конструкции ударное измельчение практически отсутствует, так как маятник создаёт в основном раздавливающее воздействие на материал с частичным его истиранием. При вращении якоря шары 7 захватываются электромагнитным полем якоря и набирают скорость, почти равную скорости вращения якоря. В верхней части камеры шары срываються и ударяются о плоскость нижнего прямого участка камеры мельницы, где происходит измельчение частиц материала. В нижней части камеры шары вновь подвергаются воздействию поля, а измельчённый материал удаляется через люк 8. Такая конструкция при достаточной силе тока позволяет сократить время на измельчение материала за счёт увеличения числа воздействий шаров друг с другом и стенками камеры, что позволяет повысить производительность мельницы.

Недостатком этой конструкции можно считать малые истирающие воздействия, реализуемые в ней, а в основном здесь происходит измельчение ударом.

Шаровая мельница (рис. 6) работает следующим образом. Материал загружается во внутреннюю часть внутреннего барабана 2, за счёт центробежных сил распределяется по его стенкам в левой части и проникает через отверстия 7 в межбарабанное пространство к шарам 5. В результате вращения барабанов в одном направлении, причём скорость вращения наружного больше в 1,5 – 2 раза скорости вращения внутреннего, происходит перемещение шаров с одновременным измельчением материала. Измельчённый материал перемещается из левой части межбарабанного пространства в правую, где через отверстия, выполненные на внутреннем барабане, устремляется в его внутреннюю часть к разгрузочной цапфе 3. Такое перемещение обусловлено создаваемым в левой части от центробежных сил давлением вновь поступающего материала на находящийся в межбарабанном пространстве материал и мелющие тела.



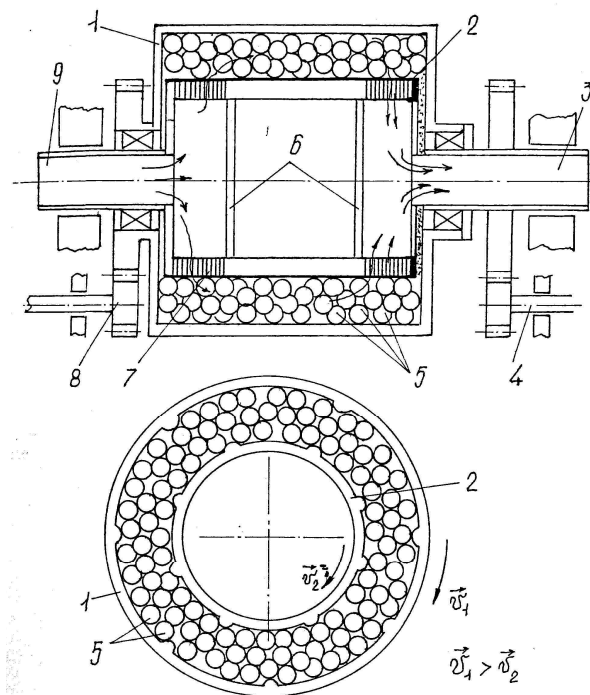


Рисунок 6 – Шаровая мельница: 1 – наружный барабан; 2 – внутренний барабан; 3 – разгрузочная цапфа; 4 – привод; 5 – шары; 6 – перегородки; 7 – отверстия; 8 – привод; 9 – загрузочная цапфа

Принцип работы мельницы этой конструкции построен на использовании чистого истирания, а динамическое (ударное) воздействие отсутствует.

Ещё одна конструкция шаровой мельницы показана на рис. 7. В этой мельнице при вращении ротора происходит захватывание загрузки в нижней части и выбрасывание её в верхней части. Аналогичные процессы протекают на противоположном роторе. Таким образом, создаётся постоянный поток выбрасываемых шаров с материалом в направлении вращения роторов. В пространстве С соударяются два противоположных потока смеси шаров с материалом. После окончания ударного воздействия и погашения скорости шаровая загрузка попадает в междудисковое пространство, и цикл повторяется. Измельчённый материал проникает через отверстия в перегородке 11 и удаляется из камеры.

В конструкции используется в основном динамическое (ударное) измельчение, при небольшом проценте дополнительного истирающего воздействия.

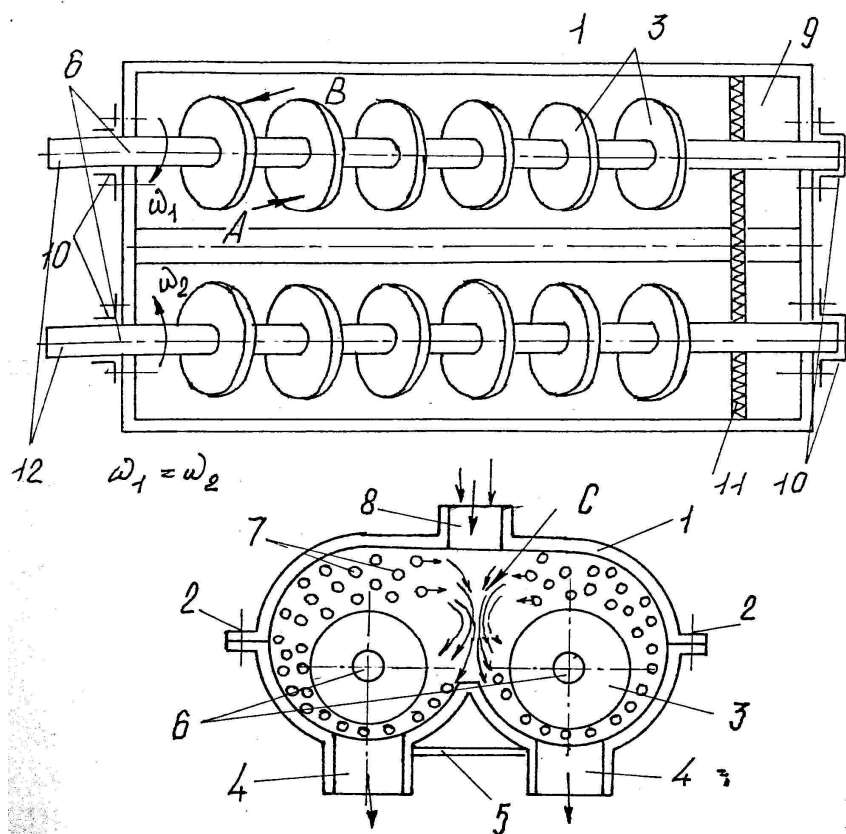


Рисунок 7 – Шаровая мельница: 1 – корпус; 2 – болты; 3 – стальные диски; 4 – течки; 5 – ребро жёсткости; 6 – валы; 7 – шары; 8 – загрузочная горловина; 9 – камера; 10 – подшипники; 11 – перегородка; 12 – шейки валов

Устройство для измельчения (рис. 8) работает следующим образом. Шаровая загрузка и материал попадают в центральную часть камеры, где происходит захват и перемещение материала и шаров в верхнюю часть камеры для соударения друг с другом. В результате столкновения материал измельчается, теряет кинетическую энергию. И вместе с шарами попадает в зону зацепления пружин, где окончательно доизмельчается за счёт истирающих сил, возникающих при взаимодействии упругих, винтообразных элементов зубчато-подобного зацепления. Подвижность линии контакта и перекрытие рабочих органов усиливает эффект истирания. После нескольких циклов готовый продукт удаляется при сухом помоле аспирационными устройствами, а при мокром помоле самоудаляется из камеры, так как устройство работает в режиме насоса.

Такая конструкция высокоэффективна, обеспечивает высокий истирающий эффект в зоне контактов витков, высокую кинетическую энергию удара за счёт встречнонаправленного движения шаров и способна самоудалять готовый продукт. Использование в конструкции упругого полого зуба в виде витка пружины позволяет мелющим телам беспрепятственно проникать сквозь зацепление, не вызывая поломки конструкции. Кроме того, пружины осуществляют роль упругой муфты.

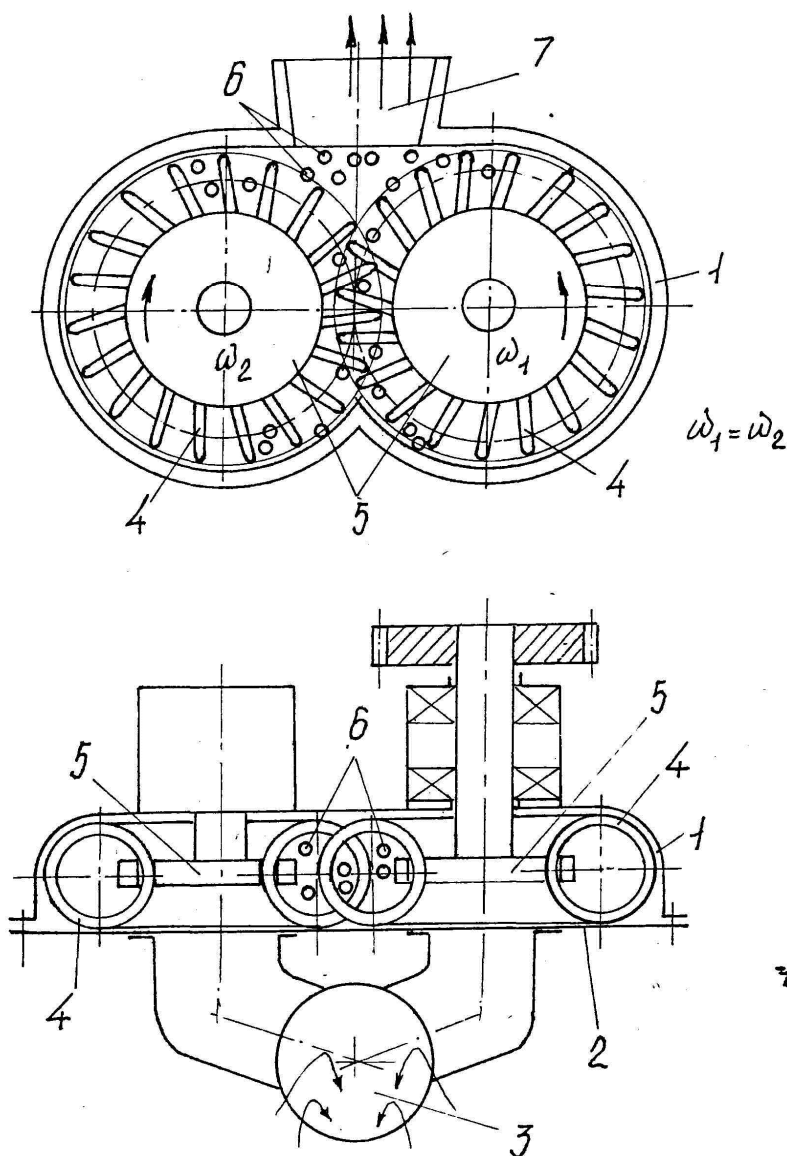


Рисунок 8 – Устройство для измельчения: 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – загрузочный люк;  
4 – цилиндрическая пружина; 5 – диски; 6 – шары; 7 – разгрузочный люк

Проведённый анализ конструкций измельчительных устройств показывает, что в подавляющем большинстве конструкций реализуется только один из наиболее предпочтительных при мелком измельчении способов разрушения материала – либо удар, либо истирание. Это не позволяет в полной мере реализовать потенциал, имеющийся в каждом из них. В последней же из рассмотренных конструкций в полной мере используются как ударное, так и истирающее воздействия, однако преимущества, достигаемые за счёт этого, сильно снижаются из-за того, что эти воздействия применяются поочерёдно, то есть их потенциал также полностью не реализуется.

Исходя из результатов анализа и опираясь на принципы синергетики, можно предло-

жить для повышения эффективности помола организовать процесс таким образом, чтобы, во-первых, процесс помола осуществлялся как за счёт ударного, так и истирающего воздействий, реализуемых в одной конструкции измельчителя, во-вторых, ударное и истирающее воздействия должны осуществляться одновременно, в-третьих, их совместное действие должно взаимно усиливать эффективность каждого из них.

Для реализации этого можно посмотреть как повышается эффективность наиболее распространённых видов воздействий, например сжатие и истирание. Установлено, что при помоле истирание эффективнее сжатия, при этом эффективность сжатия может быть повышена применением удара, то есть повышением энергонапряжённости процесса, однако, по сути, ударное воздействие есть высокоскоростное сжатие, то есть ему присущи все недостатки этого процесса. Исходя из вышеизложенного, установлено, что для мелкого измельчения эффективным может стать процесс истирания, энергонасыщенность которого повышается за счёт увеличения скорости процесса до весьма больших значений, то есть, во-первых, это удар, который как и истирающее воздействие действует по касательной. Это воздействие можно назвать ударным истиранием. Но более эффективным, на наш взгляд, будет процесс, при котором в момент удара мелющего тела по материалу и возникновения максимального сжимающего усилия к мелющему телу будет приложено вращательное или иное движение, вследствие которого в материале возникнут высокие касательные напряжения (напряжения сдвига). В этом случае будет реализована синергетическая составляющая процесса измельчения.

Дальнейшей работой будет являться поиск способов практической реализации вышеизложенных предложений в конструкциях измельчителей.

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. Из всех существующих способов измельчения наиболее предпочтительными для помола являются удар и истирание.
2. В подавляющем большинстве конструкций современных измельчителей основное измельчение осуществляется только одним способом (или ударом, или истиранием), а другой является второстепенным, либо, если названные способы измельчения реализуются в равной мере, это происходит последовательно.
3. Для повышения эффективности помола необходимо, во-первых, использовать для измельчения как ударное, так и истирающее воздействие и, во-вторых, эти воздействия должны осуществляться одновременно, так чтобы возникал синергетический эффект от их применения.

Получено 21.02.2013

УДК 629.3.083

**А.А. Давыдов, А.А. Макенов, А.Б. Сагатбекова**

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

**Ж.К. Мустафин**

Казахский университет путей сообщения, г. Алматы

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ  
И РЕМОНТА АВТОМОБИЛЕЙ

В современных условиях номенклатура и численность подвижного состава автотранспортных предприятий полностью сформировались на основе опыта многолетней организации перевозок в Республике Казахстан [1]. Вместе с тем для обеспечения нормального функционирования автотранспортной единицы в течение процесса перевозки в пределах маршрута необходимо выполнить оценку готовности каждой автотранспортной единицы к перевозке, оценку надежности эксплуатации машины как единой системы с учетом процессов восстановления системы в случае наступления отказа [2].

Все это обуславливает разработку соответствующей модели автотранспортной единицы, которая может быть представлена в виде последовательно соединенных элементов. При этом предполагается, что невозможен одновременно отказ двух и более элементов системы (исключением является дорожно-транспортное происшествие (ДТП), однако такая ситуация не предусматривается при планировании транспортного процесса). Также считаем, что к моменту устранения отказа (ремонт или замена элемента) вся система имеет готовность того же уровня, что и до наступления отказа.

Обозначим через  $F(t)$  распределение продолжительности срока службы и через  $\bar{t}$  среднее время безотказной работы элементов системы. Предположим, что в течение времени  $t$  длительность нормального функционирования равна  $T_m(t)$  и длительность простоя системы, связанного с ремонтом или заменой отдельного элемента, равна  $T_b(t)$ . При этом для восстановления системы требуется время, имеющее среднее значение  $v$ . Готовность  $K_r(t)$  системы к эксплуатации в момент времени  $t$  определяется как вероятность того, что система нормально функционирует в момент времени  $t$ . В этом случае имеем:

$$K_r(t) = \bar{F}(t) = \int_0^t F(t-u) dM_H(u), \quad (1)$$

где  $M_H(u)$  - функция восстановления, соответствующая распределению  $F$ ;  $u$  - время безотказной работы системы после истечения времени  $t$  с вероятностью  $P_i(u)$ .

Предельная готовность системы определяется следующим выражением:

$$K_r(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} K_r(t) = \frac{\bar{t}}{t + v}. \quad (2)$$

Для оценки средних значений можно использовать следующие выражения:

– средний коэффициент готовности

$$K_{rcp} = \left( 1 + \sum_{i=1}^m \frac{v_i}{\bar{t}_i} \right)^{-1}; \quad (3)$$

– среднее время нормального функционирования системы

$$\bar{t} = \left( \sum_{i=1}^m \frac{1}{t_i} \right)^{-1}; \quad (4)$$

– среднее время вынужденного простоя

$$v = \bar{t} \sum_{i=1}^m \frac{v_i}{t_i}. \quad (5)$$

Для оценки готовности системы к эксплуатации необходимо знать закон распределения времени безотказной работы  $F(t)$  и функцию восстановления  $M_H(u)$ .

Если обозначить интегральную функцию распределения времени безотказной работы автотранспортной единицы через  $F(t)$ , то  $\bar{F}(t) = 1 - F(t)$  - это вероятность его безотказной работы, или функция надежности. Условная функция интенсивности отказов определяется как:

$$r(t) = \lim_{u \rightarrow 0} \frac{F\left(\frac{u}{t}\right)}{u}, \quad (6)$$

где  $F\left(\frac{u}{t}\right) = 1 - \frac{\bar{F}(t+u)}{\bar{F}(t)}$  - условная вероятность того, что устройство, проработавшее в течение времени  $t$ , выйдет из строя в период времени  $(t; t+u)$ .

При этом дифференциальная функция распределения времени безотказной работы определится выражением:

$$f(t) = r(t) \exp \left[ - \int_0^t r(x) dx \right]. \quad (7)$$

Если принять, что интенсивность отказов автотранспортной единицы  $\lambda$  в течение планового периода эксплуатации постоянная величина, то в качестве модели можно использовать показательный закон распределения:

$$\bar{F}(t) = \exp(-\lambda t), \quad \lambda > 0, \quad t \geq 0. \quad (8)$$

В этом случае среднее значение времени безотказной работы равно  $\bar{t} = 1/\lambda$ .

Автотранспортную единицу представляем системой последовательно соединенных независимых элементов с показательным распределением времени безотказной работы. Распределение времени безотказной работы системы также подчиняется экспоненциальному закону.

Если обозначить через  $\lambda_i$  интенсивность отказов  $i$ -го элемента автотранспортной единицы, а через  $T$  и  $T_i$ , соответственно - время безотказной работы всей автотранспортной единицы и  $i$ -го элемента, то

$$P(T > t) = P\{\min(T_1, T_2, \dots, T_n) > t\} = P[T_1 > t, \dots, T_n > t] = \prod_{i=1}^n P[T_i > t] = \prod_{i=1}^n \exp(-\lambda_i t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^n \lambda_i t\right). \quad (9)$$

Следовательно, время безотказной работы автотранспортной единицы подчинено следующему закону распределения:

$$\bar{F}(t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^n \lambda_i t\right) \quad (10)$$

с интенсивностью отказов  $\sum \lambda_i$  и средним значением  $\bar{t} = \frac{1}{\sum \lambda_i}$ .

Для оценки процесса восстановления автотранспортной единицы в случае обнаружения отказа необходимо рассмотреть процесс, в котором после устранения неисправности автотранспортная единица будет иметь то же распределение продолжительности безотказной работы, что и при оценке его готовности к эксплуатации. Если  $F(t)$  является интегральной функцией распределения продолжительности срока службы, а  $F^k(t)$  есть  $k$ -кратная свертка функции  $F(t)$ , то для оценки можно использовать следующие зависимости:

$$F^1(t) = F(t); \quad F^k(t) = \int_0^t F^{(k-1)}(t-x) dF(x). \quad (11)$$

Функция  $F^k(t)$  есть не что иное, как распределение случайных величин  $\sum_{i=1}^k T_{ki}$ , где все  $T_{ki}$  независимы и имеют общую функцию распределения  $F(t)$ . Здесь  $T_i$  - это последовательные интервалы функционирования автотранспортной единицы между отказами.

Обозначим через  $N(t)$  число устранения неисправностей (количество выявленных отказов), выполненных за период  $[0, t]$ . Эта функция является неотрицательной целочисленной случайной величиной, такой, что

$$P[N(t)=0] = P[T_i > t] = \bar{F}(t); \quad (12)$$
$$P[N(t)=k] = P[T_1 + T_2 + \dots + T_k \leq t, T_{k+1} > t] = F^k(t) - F^{k+1}(t), \quad k \geq 1.$$

Случайный процесс  $\{N(t); t \geq 0\}$  является простым процессом восстановления. Математическое ожидание величины  $N(t)$  определяется выражением

$$M(t) = \sum_{k=0}^{\infty} k P[N(t)=k] = \sum_{k=1}^{\infty} F^k(t). \quad (13)$$

В случае показательного закона распределения времени безотказной работы с интенсивностью  $\lambda$  для описания процесса восстановления можно использовать распределение Пуассона с той же интенсивностью  $\lambda$ :

$$P[N(t)=k] = \frac{(\lambda t)^k \exp(-\lambda t)}{k!}. \quad (14)$$

При этом функция восстановления будет равна среднему значению случайной величины  $N(t)$ :

$$M(t) = \lambda t. \quad (15)$$

Функция восстановления автотранспортной единицы будет иметь следующий вид:

$$M(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i t. \quad (16)$$

Таким образом, нами получены расчетные формулы для оценки готовности автотранспортной единицы к эксплуатации и определения ее надежности с учетом возможности возникновения отказов в процессе перевозки грузов. Для оценки надежности транспортного процесса в течение всего периода планирования перевозок необходимо определять оценку каждой автотранспортной единицы, принятой к обслуживанию в транспортном предприятии.

При оценке качества эксплуатации автотранспортной единицы обязательным условием является обеспечение безопасного движения при выполнении транспортного процесса [3].

Надежность и безопасность работы автотранспортной единицы определяется надежностью и безотказностью ее подсистем - автотранспортной единицы и автомобильной дороги. При этом для автомобильной дороги важнейшими показателями безопасности ее функционирования являются напряжения в дорожной одежде, напряжения в балластной призме и земляном полотне.

Техническое обслуживание парка автотранспортных средств включает в себя организацию службы технического контроля, профилактический осмотр, профилактический текущий ремонт и восстановление, а также, в случае необходимости, замену отдельных узлов и деталей автотранспортной единицы. Те же задачи стоят и при оценке состояния оборудования ремонтных баз и станций, обеспечивающих техническое обслуживание автомобилей [4].

Чтобы уменьшить количество отказа деталей и узлов автотранспортной единицы и технического оборудования станции технического обслуживания (СТО), необходимо производить контрольно-диагностические осмотры для своевременного профилактического ремонта. Так как осмотры требуют определенных затрат, то оптимальная стратегия должна обеспечить постоянство соотношения между общими затратами на проведение осмотра и полученными выгодами. Так как при планировании перевозочного процесса закладывается получение максимальной прибыли (минимум непроизводственных затрат), то целевую функцию можно записать в следующем виде [5]:

$$A_{ko}(n) = V \left( 1 - \frac{\lambda(n)}{\mu} - n\bar{t}_{oc} \right) - \frac{R\lambda(n)}{\mu} - \mathcal{G}n\bar{t}_{oc}, \quad (17)$$

где  $A_{ko}(n)$  - прибыль в единицу времени, получаемая от эксплуатации автотранспортного парка;  $n$  - число осмотров и профилактических ремонтов в единицу времени;  $V$  - планируемая прибыль в единицу времени (без учета осмотра и текущего ремонта);  $\lambda(n)$  - среднее число отказов в единицу времени, обнаруженных при частоте осмотра, равное  $n$ ;  $\frac{1}{\mu}$  - средняя длительность ремонта;  $\bar{t}_{oc}$  - среднее время контрольного осмотра;  $R$  - стоимость ремонта в единицу времени;  $\mathcal{G}$  - стоимость контрольного осмотра в единицу времени.

Оптимальное количество осмотров в единицу времени, которое необходимо для получения максимальной прибыли, находим из решения уравнения

$$\frac{d\lambda}{dn} = -\mu\bar{t} \left( \frac{V + \mathcal{G}}{V + R} \right). \quad (18)$$

При определении средней длительности контрольного осмотра  $\bar{t}_{oc}$  и среднего времени ремонта  $\frac{1}{\mu}$  следует выбрать показательные законы распределения, не зависящие от ча-



стоты осмотра.

Профилактический ремонт узлов и деталей автотранспортной единицы производится для исключения аварийных ситуаций. При этом по результатам контрольного осмотра производится либо ремонт, либо восстановление изношенных деталей. Основные проблемы при организации профилактического ремонта или восстановления связаны с выбором межремонтного периода и с оценкой влияния производственных работ на последующее состояние оборудования.

#### Список литературы

1. Послание Президента Республики Казахстан Назарбаева Н.А. народу Казахстана от 6 марта 2009 года «Через кризис к обновлению и развитию» ([www.ayalyalakansko.kz/ru/measure/2009/03/25-4.shtml](http://www.ayalyalakansko.kz/ru/measure/2009/03/25-4.shtml)).
2. Транспортная стратегия Республики Казахстан до 2015 года (<http://ru.government.kz/>).
3. Осипов Ю.М. Экономические критерии показателя «значимость технического решения» АСУ конкурентоспособностью продукции / Ю.М. Осипов, С.Н. Быков // Автоматизация и современные технологии. – 1996. – № 1.
4. Транспортная логистика: Учеб. пособие /Л.Б. Миротин, Б.П. Безель, Т.О. Сулейменов и др.; Под ред. Миротина Л.Б. – М., 1996.
5. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высш. шк., 1997. – 474 с.

Получено 25.01.2013

УДК 656.13.05

**А.А. Макенов, А.Х. Машекенова, Ж.Ч. Когомбаева, А.Е. Нуғуманова**  
ВКГТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск

#### ЭКСПЕРТНАЯ ОЦЕНКА ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ПЕШЕХОДОВ НА НАЗЕМНЫХ ПЕРЕХОДАХ В ГОРОДАХ

Пешеходные потоки в значительной степени определяют характер процесса дорожного движения, и от качества организации пешеходного движения в основном зависит уровень аварийности в городах.

Статистические данные о дорожно-транспортных происшествиях (ДТП) в разных странах свидетельствуют о том, что проблема безопасности пешеходов является ключевой в общей проблеме обеспечения безопасности дорожного движения (БДД). Причем такое положение дел наблюдается даже в самых развитых и экономически процветающих государствах.

В экономически развитых государствах количество пешеходов, ставших участниками ДТП, постепенно снижается на протяжении последних лет. Однако по-прежнему в этих государствах доля пешеходов среди пострадавших в результате ДТП остается высокой. Например, в европейских государствах доля происшествий с участием транспортных средств и пешеходов колеблется от 7 до 55 %, причем в большинстве из них она составляет 12- 20 %. Различия в структуре аварийности по видам ДТП в определенной степени объясняются экономическими условиями, существующими в этих государствах, и, как следствие этого, объемами финансовых вложений в дорожную инфраструктуру, возможностями оборудования или переоборудования существующих путей сообщения с тем,

чтобы сделать их более «щадящими» по отношению к пешеходам [1].

Аналогичная ситуация складывается и в странах СНГ. Например, в Российской Федерации за 2010 год произошло 199 431 ДТП, из них 50 % приходится на наезды транспортных средств (ТС) на пешеходов [2], в Республике Казахстан за 2010 год общее число ДТП составляет 12 008, из них 44 % составляет наезд ТС на пешеходов [3]. В Республике Белоруссия всего за 9 месяцев нынешнего года произошло 1462 наезда на пешеходов, в результате которых 297 человек погибли и 1225 получили травмы.

Основное количество ДТП происходят в городах, например, в Украине в городе Киев за 2012 год произошло 1 899 ДТП, из них 697 наездов (36,7 % из общего числа ДТП) автомобилей на пешеходов и велосипедистов [4]. В Киргизии в городе Бишкек за 2012 год было зарегистрировано 1 782 ДТП, из них 996 (55,8 %) ДТП приходится на наезды ТС на пешеходов [5]. В городе Алматы в 2012 году зафиксировано 2 467 ДТП, из них 1 263 (56 %) ДТП приходится на наезды ТС на пешеходов.

Согласно статистическим данным в городе Усть-Каменогорске за 2006-2010 гг. произошло 1 638 ДТП, из которых 55 % составляют наезды ТС на пешеходов (табл. 1).

Таблица 1

*Распределение ДТП по видам*

Вид происшествия	Год				
	2006	2007	2008	2009	2010
Столкновение ТС	75	90	80	63	69
Опрокидывание ТС	23	19	12	22	16
Наезд на стоящее ТС	15	4	8	8	10
Наезд на препятствие	22	28	35	29	23
Наезд на пешехода	185	194	190	180	160
Наезд на велосипедиста	6	2	5	11	9
Иные виды	5	7	4	18	10
Итого	331	345	334	331	297

Распределение наездов ТС на пешеходов по месту их возникновения позволило установить, что значительная часть ДТП происходит в зоне пешеходных переходов (34 %), на нерегулируемых перекрестках (26 %) и в зоне остановочных пунктов общественного транспорта (20 %) (табл. 2).

Таблица 2

*Распределение наездов ТС на пешеходов по месту возникновения*

Место происшествия	Годы				
	2006	2007	2008	2009	2010
Мост	4	7	9	5	5
Зона остановки общественного транспорта	38	35	48	35	31
Пешеходный переход	56	63	55	52	52
Перекресток, регулируемый АСУД	17	28	21	24	22
Регулируемый перекресток	22	21	19	15	12
Нерегулируемый перекресток	48	40	38	49	38

Основными причинами наездов ТС на пешеходов являются такие виды нарушений Правил дорожного движения Республики Казахстан пешеходами, как переход проезжей

части в неустановленном месте (18 %), неподчинение сигналам регулирования (9 %), неожиданный выход из ТС (13 %) (табл. 3).

Таблица 3

*Распределение наездов ТС на пешеходов по причинам*

Причина ДТП	годы				
	2006	2007	2008	2009	2010
Переход проезжей части в неустановленном месте	80	22	27	26	21
Неподчинение сигналам регулирования	21	7	9	3	-
Неожиданный выход из ТС	60	12	9	7	9
Игра детей на проезжей части	9	-	2	-	-
Движение пешехода в возрасте до 7 лет без сопровождения взрослого	-	-	1	-	1
Нахождение пешехода в нетрезвом состоянии	23	12	13	5	7
Иные виды	-	-	-	7	3

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что организация движения пешеходов на улично-дорожной сети (УДС) города на сегодняшний день особенно актуальна по нескольким причинам, главными из которых являются: увеличение численности ТС в республике; дисциплина водителей ТС и пешеходов на дорогах, взаимное уважение и правильное понимание той или иной ситуации, которая складывается на участке дороги с пешеходным переходом; неукоснительное выполнение правил и рекомендаций по организации движения пешеходов.

При исследовании системы обеспечения БД пешеходов в некоторых случаях невозможно рассчитать степень влияния некоторых социальных и психологических факторов, но все эти факторы в целом оказывают существенное влияние на исследуемый параметр оптимизации, и их нельзя не учитывать. Современные методы экспертных оценок помогают устранить вышеперечисленные недостатки и уменьшить субъективность индивидуальной оценки, поэтому в исследовании данной проблемы этот метод наиболее предпочтителен.

Факторы, которые оказывают влияние на процесс движения пешеходов, условно нами разделены на следующие:

- . В1 – возраст пешехода;
- . В2 – психологические особенности;
- . В3 – цель передвижения;
- . В4 – интенсивность пешеходного потока;
- . В5 – интенсивность транспортного потока;
- . В6 – тип пешеходного перехода;
- . В7 – взаимное расположение пешеходного перехода и остановочного пункта общественного транспорта;
- . В8 – день недели;
- . В9 – время года;
- . В10 – время суток.

Для решения поставленной задачи нами было выбрано 10 экспертов. В качестве экспертов участвовали опытные сотрудники дорожной полиции и высококвалифицированные специалисты в области обеспечения безопасности дорожного движения. Экспертам предстояло провести процедуру упорядочения факторов, оказывающих влияние на безопасность пешеходов, и выставить оценку. Эксперты присваивают каждому фактору свой

ранг в зависимости от уровня его значимости, используя числа натурального ряда 1, 2, 3 и т.д. По результатам ранжирования сформирована матрица экспертных оценок (табл. 4).

Таблица 4

*Матрица значимости вариантов*

Номер эксперта	Факторы (варианты)									
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10
Э1	4	5	2	1	6	7	3	9	10	8
Э2	1	5	7	9	10	2	6	3	4	8
Э3	4	5	3	7	9	10	8	1	2	6
Э4	1	2	5	4	7	10	9	6	8	3
Э5	8	5	4	9	10	3	7	2	1	6
Э6	8	2	1	10	9	7	6	3	5	4
Э7	10	1	2	8	7	6	9	3	5	4
Э8	9	5	10	7	8	6	4	1	3	2
Э9	4	3	8	10	9	7	6	1	5	2
Э10	9	8	10	6	5	7	4	1	3	2

Во второй анкете нужно оценить компетентность экспертов (специалистов в области безопасности дорожного движения) по десятибалльной системе (максимальный балл – 10, минимальный балл – 1).

В результате проведения опроса располагаем следующей информацией: оценки в баллах, проставленные экспертами по каждому варианту; взаимооценки компетентности экспертов в баллах, причем, чем выше балл, тем меньше ранг оценки и соответственно компетентности эксперта. Количество экспертов в группе в общем случае обозначим буквой  $m$ , а количество оцениваемых вариантов обозначим  $n$ . Варианты, подлежащие оцениванию, обозначим как  $B_1, B_2, \dots, B_n$ . Оценку в баллах  $i$ -м экспертом  $j$ -го варианта в общем случае обозначать  $X_{ij}$ , где  $i$ -номер эксперта, а  $j$ - номер варианта. Перед экспертами заранее поставлены условия, чтобы оценки были для каждого варианта уникальны, т.е. не повторялись.

Из данных табл. 5 можно сделать вывод, что наиболее компетентными являются первый, третий, второй и десятый эксперты.

Таблица 5

*Взаимная групповая оценка компетентности экспертов*

Номер эксперта	Номер оцениваемого эксперта									
	Э1	Э2	Э3	Э4	Э5	Э6	Э7	Э8	Э9	Э10
Э1	10	10	10	10	9	10	9	10	10	10
Э2	10	9	9	8	8	5	7	8	6	6
Э3	10	7	9	7	9	9	7	8	8	9
Э4	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Э5	8	9	7	9	5	10	10	6	10	8
Э6	10	9	10	9	9	9	8	7	7	7
Э7	8	8	10	7	8	6	8	7	8	9
Э8	10	10	10	10	10	10	10	5	10	10
Э9	10	9	10	9	10	8	8	8	10	10
Э10	10	8	10	8	8	8	9	8	8	10
Среднее арифметическое	9,6	8,9	9,5	8,7	8,6	8,5	8,6	7,7	8,7	8,9

Далее таблицу балльных оценок (табл. 4) переводим в ранги и составляем таблицу распределения рангов (табл. 6). При переводе следуют правилу - присваивать максимальной оценке в баллах каждого эксперта максимальный ранг. Чем выше ранг, тем ниже его численное значение. Значит, самый максимальный ранг - это 1, затем следует 2, 3, 4 и т.д.

Таблица 6

*Распределение рангов*

Номер эксперта	Факторы									
	B1	B 2	B 3	B 4	B 5	B 6	B 7	B 8	B 9	B10
Э1	7	6	9	10	5	4	8	2	1	3
Э2	10	6	4	2	1	9	5	8	7	3
Э3	7	6	8	4	2	1	3	10	9	5
Э4	10	9	6	7	4	1	2	5	3	8
Э5	3	6	7	2	1	8	4	9	10	5
Э6	3	9	10	1	2	4	5	8	6	7
Э7	1	10	9	3	4	5	2	8	6	7
Э8	2	6	1	4	3	5	7	10	8	9
Э9	7	8	3	1	2	4	5	10	6	9
Э10	2	3	1	5	6	4	7	10	8	9

Вычислим квадраты отклонений в ранговых оценках первого и второго экспертов по всем оцениваемым вариантам:

$$d_j = (Z_{1j} - Z_{2j})^2, \quad (1)$$

где  $Z_{ij}$  – ранг оценки  $i$ -м экспертом  $j$ -го варианта.

Найдем сумму квадратов отклонений:

$$S_{\text{выб}} = \sum d_j^2 = \sum_{j=1}^n (Z_{1j} - Z_{2j})^2. \quad (2)$$

Проведем проверку согласованности показаний двух экспертов с помощью коэффициента ранговой корреляции Спирмена. Проверку согласованности покажем на примере показаний первых двух экспертов.

Вычислим сумму квадратов отклонений ранговых оценок 1-го и 2-го экспертов:

$$\rho = 1 - \frac{S_{\text{выб}}}{S_{\text{макс}}} = 1 - \frac{6 \sum_{j=1}^n (Z_{1j} - Z_{2j})^2}{(n^3 - n)}, \quad (3)$$

где  $n$  – число вариантов;  $S_{\text{выб}}$  – фактическая сумма квадратов;  $S_{\text{макс}}$  – максимально возможное значение суммы квадратов отклонений.

Вычисленные коэффициенты корреляции сводятся в единую корреляционную матрицу (табл. 7).

Результаты корреляционного анализа показывают, что, несмотря на некоторые оценки, совпадение мнений экспертов в целом можно считать приемлемым.

Для окончательного подведения итогов экспертизы необходимо вычислить коллек-

тивное мнение экспертов с учетом их компетентности или без компетентности экспертов.

Коллективное мнение экспертов без учета компетентности вычисляется по формуле

$$A_i = \frac{\sum_{j=1}^m (X_j)_i}{m}. \quad (4)$$

В числителе (4) суммируются не абсолютные оценки в баллах из табл. 4, а относительные оценки, которые находятся путем деления десятибалльной абсолютной оценки (табл. 4) на сумму всех оценок в соответствующей строке данной таблицы.

Например:

$$A_1 = \frac{0,072 + 0,018 + 0,072 + 0,018 + 0,145 + 0,145 + 0,181 + 0,163 + 0,072 + 0,163}{10} = 0,104.$$

Аналогично вычисляются относительные компетентности остальных вариантов.

Таблица 7

Матрица коэффициентов ранговой корреляции Спирмена

Номер эксперта	Номер эксперта									
	Э1	Э2	Э3	Э4	Э5	Э6	Э7	Э8	Э9	Э10
Э1	1	-1,2	-1,14	-0,21	-1,8	-1,04	-1,18	-1,8	-1,1	-2,2
Э2	-1,2	1	-0,2	-0,1	0,86	-0,3	-0,3	-0,43	0,18	-0,87
Э3	-1,14	-0,2	1	-0,87	0,16	0,31	0,07	-0,57	0,24	-0,43
Э4	-0,21	-0,1	-0,87	1	-1,22	-0,42	-0,43	-0,8	-0,13	-1,2
Э5	-1,8	0,86	0,16	1,22	1	0,41	0,31	0,15	0,11	-0,27
Э6	-1,04	-0,3	0,31	-0,42	0,41	1	0,76	-0,19	0,18	-0,83
Э7	-1,18	-0,3	0,07	-0,43	0,31	0,76	1	-0,29	-0,03	-0,61
Э8	-1,8	-0,43	-0,57	-0,8	0,15	-0,19	-0,29	1	0,47	0,79
Э9	-1,1	0,18	0,24	-0,13	0,11	0,18	-0,03	0,4	1	-0,43
Э10	2,2	-0,87	-0,43	-1,2	-0,27	-0,83	-0,61	0,79	-0,49	1

Далее найдем коллективную оценку каждого из вариантов с учетом компетентности экспертов по формуле

$$K_i = \frac{\sum_{j=1}^m X_{ij}}{m}, \quad (5)$$

где  $K_i$  – коэффициент компетентности  $i$ -го эксперта;  $X_{ij}$  – сумма баллов;  $m$  – количество экспертов.

Коэффициент компетентности первого эксперта:

$$K_1 = \frac{10 + 10 + 10 + 10 + 8 + 10 + 8 + 10 + 10 + 10}{10} = 9,6.$$

Коллективная оценка первого варианта с учетом компетентности экспертов:

$$B_1 = \frac{9,6 \cdot 0,072 + 8,9 \cdot 0,018 + 9,5 \cdot 0,072 + 8,7 \cdot 0,018 + 9,5 \cdot 0,145 + 8,5 \cdot 0,145 + 8,6 \cdot 0,181 + 7,7 \cdot 0,163 + 8,7 \cdot 0,072 + 8,9 \cdot 0,163}{9,6 + 8,9 + 9,5 + 8,7 + 9,5 + 8,5 + 8,6 + 7,7 + 8,7 + 8,9} = 0,103.$$

Остальные результаты расчета оценки значимости факторов приведены в табл. 8.

Таблица 8

*Относительные оценки значимости факторов*

Н	Ki	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10
Э1	9,6	0,072	0,09	0,036	0,018	0,109	0,127	0,054	0,163	0,181	0,145
Э2	8,9	0,018	0,09	0,127	0,163	0,181	0,036	0,109	0,054	0,072	0,145
Э3	9,5	0,072	0,09	0,054	0,127	0,163	0,181	0,145	0,018	0,036	0,109
Э4	8,7	0,018	0,036	0,09	0,072	0,127	0,181	0,163	0,109	0,145	0,054
Э5	9,5	0,145	0,09	0,072	0,163	0,181	0,054	0,127	0,036	0,018	0,109
Э6	8,5	0,145	0,036	0,018	0,181	0,163	0,127	0,109	0,054	0,09	0,072
Э7	8,6	0,181	0,018	0,036	0,145	0,127	0,109	0,163	0,054	0,09	0,072
Э8	7,7	0,163	0,09	0,181	0,127	0,145	0,109	0,072	0,018	0,054	0,036
Э9	8,7	0,072	0,054	0,145	0,181	0,163	0,127	0,109	0,018	0,09	0,036
Э10	8,9	0,163	0,145	0,181	0,109	0,09	0,127	0,072	0,018	0,054	0,036
Aj		0,104	0,074	0,094	0,128	0,144	0,118	0,112	0,054	0,083	0,082
Bj		0,103	0,074	0,092	0,127	0,142	0,118	0,112	0,055	0,083	0,083
Pj		5	9	8	2	1	3	4	10	6	7

Результаты экспертизы показывают, что первый ранг присвоен интенсивности транспортного потока, второй ранг - интенсивности пешеходного потока, затем - типу пешеходного перехода и т.д.

Для решения проблем, связанных с обеспечением безопасности движения пешеходов в городах, необходимо:

- оптимально распределить транспортные потоки на УДС города;
- повысить эффективность управления дорожным движением;
- усовершенствовать систему стоянок ТС на УДС города.

## Список литературы

1. Безопасность пешеходов в дорожном движении: Обзорная информация. - М.: НИЦ ГИБДД МВД России, 2004. - Вып. 12. - 28 с.
2. <http://www.gibdd.ru/>
3. <http://pravstat.prokuror.kz/rus/novosti/press-releasy/o-sostoyanie-ucheta-dorozhno-transportnyh-proisshествiy-za-2012-god>.
4. <http://telegraf.com.ua/ukraina/obshchestvo/bolshinstvo-dtp-v-kievskoy-oblasti-naezdy-na-peshehodov.html>.
5. <http://svodka.akipress.org/news:131110>.
6. Романов А.Г. Дорожное движение в городах: Закономерности и тенденции. - М.: Транспорт, 1984. - 80 с.
7. Буга П.Г. Организация пешеходного движения в городах: Учеб. пособие для вузов / П.Г. Буга, Д.Д. Шелков. - М.: Высш. шк., 1980. - 232 с.

Получено 21.02.2013

УДК 678.534.4

**С.В. Нечипуренко, С.А. Ефремов, М.К. Наурызбаев**

КазНУ им. аль-Фараби, ДГП «Центр физико-химических методов исследования и анализа», г. Алматы

**Е.Н. Иващенко**

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

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СОРБЦИОННОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ ВАНАДИЯ  
УГЛЕРОД-МИНЕРАЛЬНЫМИ СОРБЕНТАМИ НА ОСНОВЕ ШУНГИТОВЫХ ПОРОД  
ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА**

При производстве ванадия образуется значительное количество экологически опасных сточных вод, которые после предварительной очистки сбрасываются в открытые водоемы. В сточных водах находится большое количество токсичных соединений, среди которых особенно опасен пятивалентный ванадий, предельные концентрации (ПДК) которого в виде воздушных аэрозолей равны 0,1-0,5 мг/м<sup>3</sup> [1].

Среди наиболее эффективных методов, применяемых для решения проблемы водочистки, можно назвать сорбцию на активированных углях и пористых минеральных материалах, позволяющую снизить содержание ванадия и других токсичных веществ до норм ПДК [2-3]. Использование для этих целей активированных углей имеет ряд недостатков: низкая прочность на истирание, потери при регенерации, низкая адсорбционная емкость, дороговизна (экономические затраты).

В последние годы получены положительные результаты при использовании альтернативных, доступных и дешевых минеральных сорбентов как синтезированных, так и природного происхождения [4].

Шунгитовые породы Восточного Казахстана (Кызыловская зона смятия) имеют сложный минералогический состав: кварц (52 %), гидрослюда (15 %), шунгитовый углерод (20 %), полевошпат (10 %), пирит (2 %). Из второстепенных минералов присутствуют карбонаты (кальцит, доломит) и гипс [5]. Вследствие этого шунгит представляет интерес как комплексный сорбент, обладающий свойствами и силикатных, и углеродных материалов.

Целью настоящей работы является изучение сорбции ванадат-ионов из модельных растворов модифицированными шунгитовыми сорбентами. Модифицированные шунгитовые сорбенты были приготовлены на основе углеродных концентратов (содержание углерода ~ 40,0 %). В качестве связующего для получения брикетов из шунгита использовали разные органические связующие I и II серий (отходы пищевой и химической промышленности, соответственно).

Сорбционную емкость шунгитовых сорбентов по ванадию исследовали в статических условиях при комнатной температуре. При проведении экспериментов в качестве стандарта использовали постоянные навески сорбента массой 1 г и объемы водного раствора ванадия определенной концентрации - 100 мл. Контроль кислотности растворов осуществляли с помощью иономера Аквилон – И500 с платиновым электродом. Водородный показатель (рН) растворов регулировали путем добавления HCl или NaOH.

Содержание ванадия в жидкой фазе контролировали объемным методом с использованием соли Мора в присутствии фенилантраниловой кислоты, а также современными инструментальными методами на атомно-абсорбционном спектрометре. При изучении



сорбционных характеристик по ванадию полученные сорбенты помещали в колбы с притертыми пробками и встряхивали со скоростью 150 об/мин в течение определенного времени. После установления равновесия и разделения жидкой и твердой фаз, фильтрат анализировали на содержание ванадия.

Кинетические кривые сорбции с начальной концентрацией ванадия в растворе 0,1 моль/дм<sup>3</sup> на шунгитовом сорбенте серии I (кривая 1) и на шунгитовом сорбенте серии II (кривая 2) приведены на рис. 1.

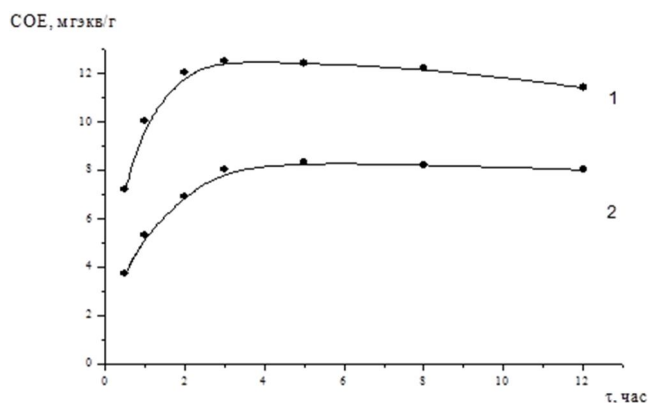


Рисунок 1 - Кинетические кривые статической обменной емкости ванадия

Форма полученных сорбционных кривых показывает, что сорбция ванадия при низких концентрациях протекает достаточно быстро, причем на сорбенте серии I быстрее, чем на сорбенте серии II. После 2-2,5 часов интенсивного перемешивания процесс сорбции практически прекращается для 2-х видов сорбентов. Величина предельной статической обменной емкости (СОЕ) при 8÷12-часовом перемешивании даже несколько снижается на обоих изученных образцах сорбентов за счет десорбционных процессов и составляет 12 и 8 мг-экв/г для сорбентов I и II серии, соответственно.

На рис. 2 приведены величины предельной сорбционной емкости изучаемых сорбентов в зависимости от концентрации ванадия в водных растворах.

Поглощение ванадия изучаемыми сорбентами характеризуется выпуклыми изотермами сорбции без насыщения, которые удовлетворительно описываются уравнением Фрейндлиха (рис. 2). Статическая обменная емкость при всех изменениях концентрации ванадия в водном растворе для шунгитового сорбента серии I больше, чем для шунгитового сорбента серии II. Наибольшая величина СОЕ для обоих образцов исследованного шунгита при поглощении ванадия из раствора с концентрацией 0,1 моль/дм<sup>3</sup> составляет 12,5 и 22,4 мг-экв/г, соответственно.

Как известно, водные растворы ванадия [6-7] характеризуются многообразием форм существования в зависимости от концентрации ванадия и pH среды. В зависимости от pH раствора доминирующими ионами являются: pH 3-6 -  $\text{VO}_3^-$ , pH 7-10 -  $\text{HVO}_4^{2-}$  и при 10-12,5 -  $\text{VO}_4^{3-}$ . Увеличение концентрации ванадия до  $10^{-3}$  М и выше приводит к процессу полимеризации с образованием сложных по составу ионов, где доминирующими в зависимости от pH считают: pH 4-8 -  $\text{H}_3\text{V}_2\text{O}_7$ ; pH 8-11 -  $\text{H}_2\text{VO}_4^-$  и pH 11-12 -  $\text{HVO}_4^{2-}$ . В об-

ласти pH 1-2 катионы полимеризуются с образованием  $[(VO_2)_{10}(OH)_{14}]^{4+}$ , а при pH 2-8 существуют ионы разнообразного состава:  $[V_3O_9]^{3-}$ ,  $[V_4O_{12}]^{4-}$ ,  $[HV_6O_{17}]^{3-}$ ,  $[HV_{10}O_{28}]^{5-}$ ,  $[H_2V_{10}O_{28}]^{4-}$  и другие сложные полимерные частицы.

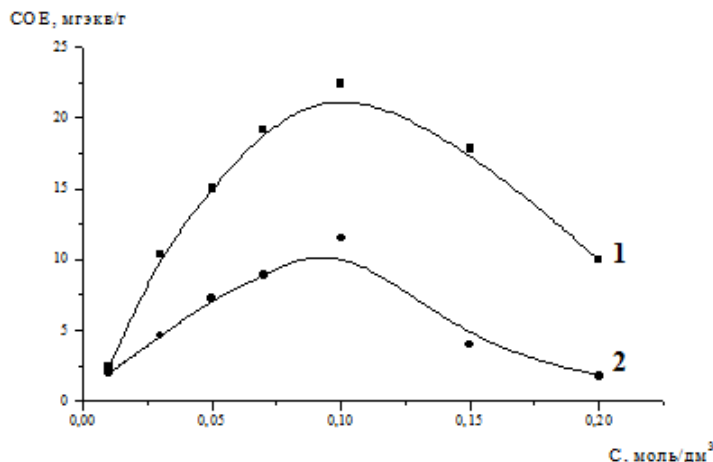


Рисунок 2 - Зависимость статической обменной емкости шунгитового сорбента от концентрации ванадия

Нами предполагается, что во всем диапазоне pH раствора происходит селективная сорбция на исследуемых сорбентах описанных ванадат-ионов. Экспериментальные данные по изучению влияния pH среды на сорбционную емкость сорбентов (серии I и II) представлены на рис. 3.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в области кислых растворов  $pH = 2-4$  степень поглощения ванадат-ионов исследуемыми сорбентами наибольшая. СОЕ меняется от 12,8 до 16 мг-экв/г соответственно на шунгитовых сорбентах серии I и II. Причем кривая предельной сорбционной емкости для сорбента серии II (рис. 3) находится незначительно выше аналогичной кривой для сорбента серии I. Далее, значения предельной сорбционной емкости для обеих форм сорбентов несколько повышаются в пределах  $pH 5,5-8,5$ . Интересно отметить, что в области сильнощелочных растворов наблюдается достаточно резкое уменьшение (в 1,5-2 раза) сорбционной емкости сорбента серии I и, наоборот, для сорбента серии II характерно значительное увеличение степени поглощения ванадат-ионов.

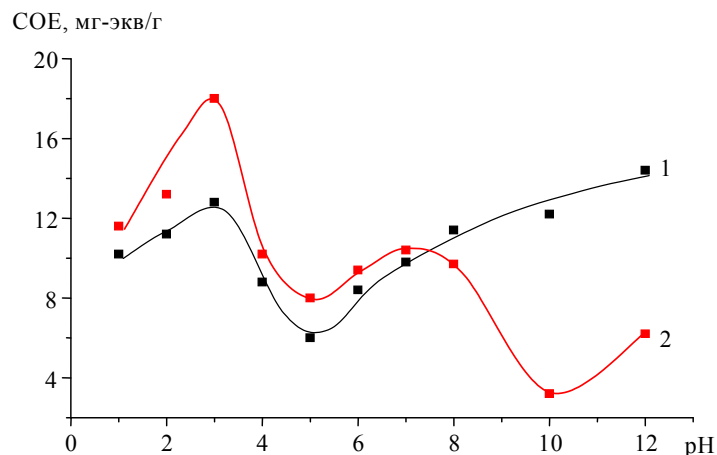


Рисунок 3 - Зависимость статической обменной емкости шунгитовых сорбентов от pH среды

Таким образом, из приведенных данных следует, что наибольшее поглощение ванадия на шунгитовых сорбентах происходит в области кислых растворов ( $\text{pH} = 2-4$ ). СОЕ при этом составляет 12,8 и 18,7 мг-экв/г для сорбентов I и II серии, соответственно. Значение остаточных концентраций ванадия составляет около  $0,22 \text{ г/дм}^3$ , что указывает на возможность доочистки водных ванадийсодержащих растворов до норм ПДК по ванадию.

#### Список литературы

1. Филова В.А. Вредные химические вещества. Неорганические соединения элементов I-IV групп. - Л.: Химия, 1988. - 512 с.
2. Смирнов А.Д. Сорбционная очистка воды. - Л.: Химия, 1992. - 168 с.
3. Антонюк Н.Г. Активированные угли как сорбенты для очистки воды / Н.Г. Антонюк, Т.В. Кармазина // Химия и технология воды. - 1997. - Т. 19. - № 6. - С. 617-622.
4. Цель А.В. Получение модифицированного углерод-минерального сорбента на основе шунгитовых пород /А.В. Цель, Р.А. Вафин, С.В. Нечипуренко и др. // «Вестник» КазНУ им. аль-Фараби; Сер. химия. - 2009. - № 2(54). - Алматы, 2009. - С. 106-109.
5. Ефремов С.А. Технология производства углерод-минеральных материалов на основе шунгитовых пород. - Автореф. дис. ... д-ра хим. наук. - Алматы, 2010. - 33 с.
6. Лузгин В.Н. Аналитическая химия ванадия / В.Н. Лузгин, В.Н. Хамзина, В.Л. Золотавин и др. - М.: Наука, 1988. - 215 с.
7. Морачевский Ю.В. Основы аналитической химии редких элементов / Ю.В. Морачевский, И.А. Церковницкая. - Л.: ЛГУ, 1980. - 207 с.

Получено 26.02.2013

по страницам



## **ЭЛЕКТРОМОБИЛЬ КАК ИСТОЧНИК ТОКА**

---

Владельцы электромобиля Nissan Leaf смогут теперь воспользоваться им как аварийным источником электроэнергии. Фирма начала выпуск преобразователя. Прибор размером с небольшой холодильник устанавливается в гараже или в подвале дома и преобразует постоянный ток от батареи в ток бытового напряжения и частоты, подаваемый в домашнюю сеть. В случае какого-либо природного катаклизма одного заряда электромобиля хватит среднему японскому дому почти на двое суток.

«Наука и жизнь» № 3, 2013