

ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.33.013.3

К ВОПРОСУ ОБ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛИНЫ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОМПЛЕКСНО-МЕХАНИЗИРОВАННОГО ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ

А. А. Ордин, А. А. Метельков

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: ordin@misd.nsc.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Изложена постановка задачи и приведены аналитические решения оптимизации длины комплексно-механизированного очистного забоя по критерию максимума прибыли.

Оптимизация, прибыль, длина и производительность комплексно-механизированного очистного забоя, шахта

ВВЕДЕНИЕ

В мире проведено большое количество различных исследований в области оптимального проектирования технологических параметров угольных шахт [1 – 7].

В России основоположником аналитических расчетов в этой области следует считать профессора Б. И. Бокия, опубликовавшего в 1914 г. практический и в 1929 г. аналитический курсы горного искусства [8–9]. В дальнейшем аналитические методы в проектировании угольных шахт использовали Л. Д. Шевяков, С. М. Липкович, П. З. Звягин, А. М. Курносков, С. Цой, Е. И. Рогов, К. Н. Адилов, А. С. Астахов, Н. В. Дронов, В. Н. Вылегжанин, В. И. Штеле, Г. А. Стрекачинский, В. А. Федорин и многие другие [10–32].

Существует также большое количество публикаций в области оптимизации длины и производительности очистного забоя, размеров выемочного поля и панели шахты [11, 13, 20, 26–32]. Особенно следует выделить работу С. М. Липковича [11], являющегося основоположником моделирования технологических параметров и применения аналитических методов для решения горнотехнических задач при проектировании угольных шахт.

В большинстве работ, посвященных решению данной задачи, в качестве критерия оптимальности использовался минимум себестоимости добычи угля в очистном забое [11, 13, 20]. Так, в [11] рациональная длина (L) лавы, оборудованной комплексом, определяется путем минимизации функции себестоимости добычи угля (руб./т) в виде

$$f(L) = \frac{C_1}{L} + C_2L + C_3 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где C_1, C_2, C_3 — стоимостные коэффициенты, учитывающие все виды эксплуатационных затрат в очистном забое.

Следует заметить, что удельным критериям оптимальности типа себестоимости добычи угля (1) присущи существенные недостатки, заключающиеся в широкой области субоптимальных решений и отсутствии системного подхода. В частности, в модели (1) отсутствует весьма важный показатель — оптовая цена угля, зависящая от его качества: марки угля, зольности, влажности, выхода летучих веществ и др. По этой причине среди экономистов давно сложилось мнение, что “...удельные показатели можно использовать только в том случае, если расчет по ним дает тот же результат, что и по суммарным критериям оптимальности” [33, с. 185]. Но при достижении одинаковых результатов, безусловно, вообще теряется смысл составления оптимизационных моделей технологических процессов по удельным показателям.

В работе [26] для оптимизации длины лавы предлагалось использовать в качестве критерия оптимальности интегральные показатели: минимум суммарных амортизационных отчислений на полное восстановление механизированного комплекса и максимум интегральной прибыли, полученной из очистного забоя. Однако последний критерий — максимум прибыли — приведен в [26] только в самой общей постановочной форме.

Таким образом, несмотря на большое количество опубликованных работ, посвященных оптимизации длины комплексно-механизированного очистного забоя (КМЗ), исследование этой задачи с использованием системных интегральных критериев оптимальности является актуальным.

Исследуем вначале основные зависимости производительности комплексно-механизированного очистного забоя от длины лавы по горно-геологическим и горнотехническим факторам. Затем в рамках подсистемы “очистной забой” решим задачу оптимизации длины лавы по условию максимума годовой прибыли шахты.

ЗАВИСИМОСТЬ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОЧИСТНОГО КОМБАЙНА ОТ ДЛИНЫ ЛАВЫ

В ИГД СО РАН совместно с ЗАО “Гипроуголь” разрабатывается методическое и программное обеспечение (программа “ПРОЗА-4.0”) для обоснования рациональной производительности комплексно-механизированного очистного забоя шахты по технологическим факторам для пологих угольных пластов. Основные отличительные особенности этой методики заключаются в следующем.

Для расчета теоретической производительности очистного комбайна предварительно определяется скорость его подачи (м/мин) по известной формуле [31]:

$$v_{\text{п}} = \frac{N\eta}{F_{\text{с}}} = \frac{30N\eta n_{\text{л}} K_{\text{п}}}{S_{\text{ср}} D n_3 K_{\text{от}} K_{\alpha} K_b K_{\text{зр}} K_{\text{фр}}}, \quad (2)$$

где N — мощность электродвигателя рабочего органа, кВт; η — КПД редуктора исполнительного органа; $F_{\text{с}}$ — суммарная составляющая реакции забоя, кН; $n_{\text{л}}$ — количество резцов в одной линии резания, принимается в зависимости от конструкции шнека ($n = 2, 3, 4$); $K_{\text{п}}$ — коэффициент, учитывающий затраты мощности на перемещение комбайна; D — диаметр шнеков комбайна, м; n_3 — количество резцов, разрушающих забой одновременно (для большинства очистных комбайнов в работе обычно участвует половина всех резцов на шнеке, т. е. $n_3 = 14 - 50$); $S_{\text{ср}}$ — средневзвешенная сопротивляемость пласта угля резанию, кН/м; $K_{\text{от}}$ —

коэффициент отжима, учитывающий уменьшение сил резания вследствие горного давления; K_α , K_b , $K_{зр}$, $K_{фр}$ — коэффициенты, соответственно учитывающие угол резания, ширину реза, затупление и форму резцов.

В формуле (2) отсутствует влияние угла падения пласта на скорость подачи комбайна. Для учета угла падения пласта рассмотрим схему действия сил на очистной комбайн (рис. 1). Основное уравнение динамики его движения с учетом проекций действующих сил на ось x выглядит следующим образом [34]:

$$m_k \frac{\partial v_{\text{п}}}{\partial t} = F_T - F_{\text{тр}} - P_x - F_c = F_T - fP \cos \alpha \pm P \sin \alpha - F_c, \quad (3)$$

где m_k — масса комбайна; P — вес комбайна; $v_{\text{п}}$ — скорость подачи комбайна; F_T — усилие подачи комбайна; $F_{\text{тр}}$ — сила трения между комбайном и конвейером; $f = 0.18 - 0.25$ — коэффициент трения между комбайном и конвейером; P_x — составляющая веса комбайна по направлению его движения; $F_c = F_x + F'_x$ — суммарная составляющая реакции забоя на исполнительный орган, зависящая от сопротивляемости пласта резанию (рис. 1).

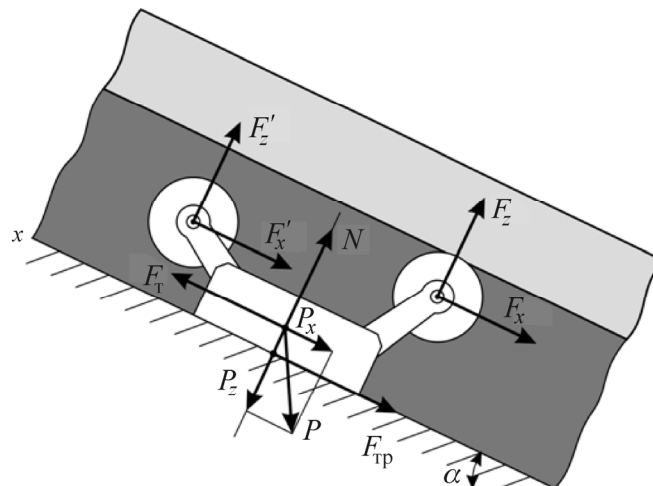


Рис. 1. Схема действия сил на очистной комбайн

При установившемся равномерном движении комбайна его ускорение равно нулю и скорость подачи является постоянной величиной. В этом случае равнодействующая всех сил в проекции на ось x , действующих на комбайн, равна нулю, отсюда сила тяги комбайна находится по формуле

$$F_T = fP \cos \alpha \pm P \sin \alpha + F_c. \quad (4)$$

В формулах (1), (2) знак “плюс” перед составляющей веса комбайна стоит при его движении вверх по лаве, а знак “минус” — вниз по лаве.

Так как мощность комбайна определяется как произведение силы тяги на скорость перемещения ($N = F_T v$), то скорость подачи комбайна рассчитывается по формуле

$$v_{\text{п}} = \frac{N_S \eta}{fP \cos \alpha \pm P \sin \alpha + F_c}, \quad (5)$$

где N_S — суммарная мощность всех электродвигателей очистного комбайна, кВт.

Подставляя в формулу (5) реакцию забоя (F_c) из (2), окончательно получаем зависимость скорости подачи очистного комбайна от суммарной мощности электродвигателей, сопротивляемости пласта резанию, угла падения пласта и направления движения комбайна:

$$v_{\Pi} = \frac{30N_s \eta_{1л} K_{\Pi}}{fP \cos \alpha \pm P \sin \alpha + S_{cp} D n_3 K_{от} K_{\alpha} K_b K_{зр} K_{фр}} \quad (6)$$

Теперь рассмотрим расчет производительности очистного комбайна в зависимости от его скорости подачи, времени и схемы работы в забое.

При односторонней схеме работы очистного комбайна время, необходимое для снятия одной стружки, вычисляется по формуле [34, 35]

$$T = T_1 + T_2 + T_{ко} = \frac{L}{v_{\Pi}} + \frac{L}{v_M} + \frac{k_y L_k}{v_K}, \quad (7)$$

где T_1 , T_2 , $T_{ко}$ — время работы комбайна соответственно по выемке, зачистке отбитого угля и на концевые операции в лаве, мин; L — длина лавы, м; v_{Π} , v_M — соответственно рабочая и маневровая скорости подачи комбайна, м/мин; $k_y = 1.0 - 1.3$ — коэффициент организации и условий труда; $L_k = 15 - 20$ м — длина косога заезда; $v_K = 1.5 - 2.0$ м/мин — скорость подачи комбайна при косом заезде.

При челноковой схеме работы очистного комбайна время одного цикла, необходимое для снятия двух стружек (вверх и вниз по лаве), определяется по формуле [34, 35]

$$T = T_1 + T_2 + 2T_{ко} = \frac{L}{v_{\Pi 1}} + \frac{L}{v_{\Pi 2}} + 2k_y \left(\frac{3L_k}{v_K} + 5t_{mo} + \frac{r}{v_{фк}} \right), \quad (8)$$

где $v_{\Pi 1}$ и $v_{\Pi 2}$ — скорости подачи комбайна при движении соответственно вверх и вниз по лаве, определяются по формуле (6), в которой соответственно изменяются знаки в знаменателе: “плюс” при движении вверх по лаве и “минус” — вниз по лаве; $T_{ко}$ — время на концевые операции, определяемое по формуле, приведенной в работе [35]; $t_{mo} = 1 - 2$ мин — время вертикальных перемещений исполнительного органа при косом заезде и доработке концевых участков лавы; r — ширина захвата исполнительного органа комбайна, м; $v_{фк} = 1.0$ м/мин — скорость фланговой передвижки концевого участка конвейера по зарубке.

Количество стружек угля в сутки при односторонней схеме или циклов при челноковой схеме работы комбайна рассчитывается по формуле [34]:

$$n = \frac{60n_{см} T_{см}}{T}, \quad (9)$$

где $n_{см}$ — количество рабочих смен в сутки; $T_{см}$ — длительность рабочей смены, ч.

Суточная добыча угля в лаве при односторонней схеме работы комбайна с учетом формул (7), (9) находится по зависимости

$$A = n \gamma m r L = \frac{60 \gamma m r L n_{см} T_{см}}{T} = \frac{60 \gamma m r L n_{см} T_{см}}{\frac{L}{v_{\Pi}} + \frac{L}{v_M} + T_{ко}} = \frac{60 \gamma m r L n_{см} T_{см}}{\frac{1}{v_{\Pi}} + \frac{1}{v_M} + \frac{k_y L_k}{v_K}}, \quad (10)$$

где m — средняя вынимаемая мощность пласта с учетом породных прослоек, м; r — ширина захвата комбайна, м; γ — плотность горной массы, т/м³.

При челноковой схеме работы комбайна суточная добыча угля в лаве с учетом формул (8), (9) составляет:

$$A = 2n\gamma mrL = \frac{120\gamma mrLn_{cm}T_{cm}}{T} = \frac{120\gamma mrLn_{cm}T_{cm}}{\frac{L}{v_{п1}} + \frac{L}{v_{п2}} + 2T_{ко}} = \frac{120\gamma mrn_{cm}T_{cm}}{\frac{1}{v_{п1}} + \frac{1}{v_{п2}} + \frac{2k_y}{L} \left(\frac{3L_k}{v_k} + 5t_{мо} + \frac{r}{v_{фк}} \right)}. \quad (11)$$

Подставляя в формулы (10), (11) зависимость скорости подачи комбайна (6), после преобразований окончательно получаем суточную теоретическую производительность очистного забоя:

- при односторонней схеме работы комбайна

$$A = \frac{60\gamma mrn_{cm}T_{cm}}{\frac{fP\cos\alpha \pm P\sin\alpha + S_{cp}Dn_3K_{от}K_aK_bK_{зр}K_{фр}}{30N\eta_{пл}K_{п}} + \frac{1}{v_m} + \frac{k_yL_k}{v_kL}}, \quad (12)$$

- при челноковой работе комбайна

$$A = \frac{60\gamma mrn_{cm}T_{cm}}{\frac{fP\cos\alpha + S_{cp}Dn_3K_{от}K_aK_bK_{зр}K_{фр}}{30N\eta_{пл}K_{п}} + \frac{k_y}{L} \left(\frac{3L_k}{v_k} + 5t_{мо} + \frac{r}{v_{фк}} \right)}. \quad (13)$$

Анализ этих зависимостей показывает, что теоретическая производительность очистного комбайна имеет нелинейную асимптотическую зависимость от длины лавы в отличие от линейной функции, приведенной в [11]. В обобщенном виде эти зависимости (12), (13) можно представить в виде

$$A_i(L) = \frac{a}{b_i + \frac{d_i}{L}}, \quad i = 1, 2, \quad (14)$$

где a , b_i , d_i — параметры, определяемые из зависимостей (12), (13) соответственно при односторонней ($i = 1$) или челноковой ($i = 2$) схемах работы комбайна.

Из анализа зависимости (14) следует, что выбор оптимальной схемы работы комбайна можно проводить, максимизируя его производительность. Так, на рис. 2 приведена зависимость (14) суточной производительности очистного комбайна К500 от длины лавы. Как видно, челноковая схема движения комбайна имеет преимущества перед односторонней схемой с зачисткой только для длинных лав, т. е. при длине очистного забоя более 200 м.

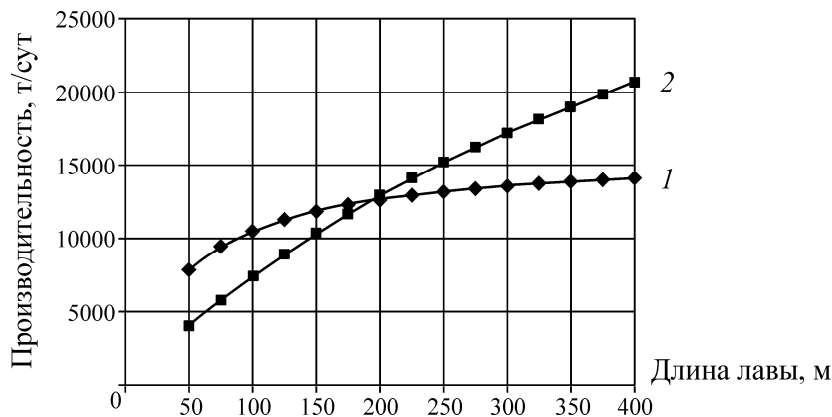


Рис. 2. Зависимость производительности очистного комбайна К500 от длины лавы при односторонней (1) и челноковой (2) схеме работы

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ ЗАДАЧИ И АНАЛИТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

Из зависимости (14) следует, что годовой доход, получаемый шахтой от продажи угля из очистного забоя, также является нелинейной возрастающей асимптотической функцией от длины лавы, которую можно записать в виде

$$S(L) = sn_p A(L) = \frac{sn_p a}{b_i + \frac{d_i}{L}}, \quad i = 1, 2, \tag{15}$$

где s — оптовая цена 1 т угля, зависящая от марки угля и его качества, руб./т; n_p — количество рабочих дней в году.

Годовые эксплуатационные затраты в очистном забое определим в виде линейной функции от длины очистного забоя с выделением амортизационных отчислений [26]:

$$C(L) = C_o + H_o K_o + (H_k k_k + H_c k_c) L, \tag{16}$$

где C_o — постоянные расходы в очистном забое на зарплату, материалы и электроэнергию, не зависящие от его длины, руб./год; H_o, H_k, H_c — нормы амортизации соответственно для очистного комбайна, механизированной крепи и лавного скребкового конвейера; K_o — капитальные затраты на приобретение очистного комбайна, руб.; k_k, k_c — удельные капитальные вложения на приобретение соответственно механизированной крепи и скребкового лавного конвейера, руб./м.

Тогда годовая прибыль, получаемая шахтой от продажи угля из очистного забоя с учетом формул (15), (16), выражается зависимостью

$$P(L) = \frac{sn_1 a}{b_i + \frac{d_i}{L}} - (C_o + H_o K_o + (H_k k_k + H_c k_c) L) \rightarrow \max, \quad i = 1, 2, \tag{17}$$

при соблюдении ограничения $A_i(L) \leq A_B$, где A_B — допускаемая производительность очистного забоя по фактору проветривания.

На рис. 3а приведена общая схема формирования максимума данной целевой функции, где обозначены: D_o — годовой доход от продажи угля из очистного забоя, млн руб./год; A_m — годовые амортизационные отчисления на КМЗ, млн руб./год; P — годовая прибыль очистного забоя, млн руб./год.

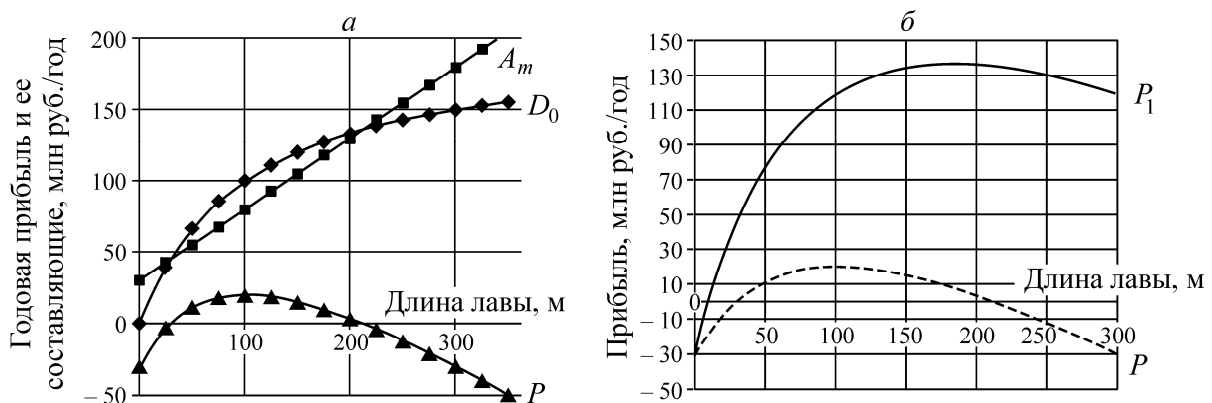


Рис. 3. Зависимость годовой прибыли от длины очистного забоя: а — общая схема формирования максимума целевой функции; б — для энергетических (P) и коксующихся (P_1) углей

Поиск максимума функции (17) сводится к ее дифференцированию и решению уравнения ($dP/dL = 0$), которое, с учетом формул (12), (13), имеет вид

$$L_o = \frac{1}{b_i} \left(\sqrt{\frac{sd_i a}{c_1}} - d_i \right) = \frac{1}{b_i} \left(\sqrt{\frac{60sd_i \gamma m r n_{cm} T_{cm} n_p}{H_k k_k + H_c k_c}} - d_i \right), \quad i = 1, 2, \quad (18)$$

где коэффициенты b_i , d_i определяются по формулам:

- для односторонней схемы работы комбайна

$$b_1 = \frac{fP \cos \alpha \pm P \sin \alpha + S_{cp} n_3 K_{от} K_a K_b K_{зр} K_{фр}}{30 N_s \eta n_{1л} K_{п}} + \frac{1}{v_m}; \quad d_1 = \frac{k_y L_k}{v_k}, \quad (19)$$

- для челноковой схемы работы комбайна

$$b_2 = \frac{fP \cos \alpha + S_{cp} D n_3 K_{от} K_\alpha K_b K_{зр} K_{фр}}{30 N_s \eta n_{1л} K_{п}}; \quad d_2 = k_y \left(\frac{3L_k}{v_k} + 5t_{мо} + \frac{r}{v_{фк}} \right). \quad (20)$$

Для челноковой схемы движения комбайна оптимальная длина лавы в конечном итоге может быть записана так:

$$L_o = \frac{30 N_s \eta n_{1л} K_{п}}{fP \cos \alpha + S_{cp} D n_3 K_{от} K_\alpha K_b K_{зр} K_{фр}} \left(\sqrt{\frac{60sd_2 \gamma m r n_{cm} T_{cm} n_p}{H_k k_k + H_c k_c}} - d_2 \right). \quad (21)$$

Из анализа полученных формул (19)–(21) следует, что оптимальная длина очистного забоя:

— нелинейно возрастает с увеличением оптовой цены (s) угля, мощности пласта (m), ширины захвата (r) комбайна и убывает с ростом стоимости механизированной крепи (k_k) и скребкового конвейера (k_c);

— линейно возрастает с увеличением мощности электродвигателей (N_s) очистного комбайна и нелинейно убывает с возрастанием сопротивляемости угля резанию (S_{cp}), угла (α) падения пласта, диаметра (D) шнека.

Отсюда следует, что при разработке пласта с более ценной маркой угля, например коксующегося, оптимальная длина очистного забоя нелинейно увеличивается по сравнению с длиной забоя при отработке энергетических углей. Так, при росте оптовой цены угля в 3 раза оптимальная длина КМЗ увеличивается с 120 до 200 м (рис. 3б).

Кроме того, поскольку сопротивляемость угля резанию зависит от наличия породных прослоек в пласте, при увеличении в пласте количества породных прослоек, их мощности и крепости оптимальная длина очистного забоя уменьшается.

Из анализа зависимости (17) также следует, что существуют минимально и максимально допускаемые длины очистного забоя, формирующие область безубыточности работы КМЗ (см. рис. 3а). Из рис. 3б видно, что при отработке угля более ценной марки минимально допускаемая длина очистного забоя снижается, а максимально допустимая длина лавы возрастает, тем самым увеличивая область безубыточности работы КМЗ.

Следует заметить, что при увеличении длины лавы больше значения, определенного по формуле (18), производительность очистного забоя нелинейно возрастает в соответствии с зависимостью (14), а прибыль уменьшается. Следовательно, подставляя зависимость (18) опти-

мальной длины лавы в формулу (14), получаем выражение для наиболее рациональной производительности очистного забоя, при которой годовая прибыль достигает максимума:

$$A_o(L_o) = \frac{a_i}{b_i + \frac{d_i}{L_o}} = \frac{a_i}{b_i + \frac{d_i}{\frac{1}{b_i} \left(\sqrt{\frac{sd_i a_i}{c_1}} - d_i \right)}} \leq A_B, \quad i = 1, 2. \quad (22)$$

При выполнении ограничения по фактору проветривания очистного забоя необходимо учитывать зависимость длины очистного забоя от его производительности. Поэтому на оптимальную длину лавы, определяемую по формулам (18) – (21), необходимо ввести соответствующее ограничение:

$$L_o \leq L_{Bi} = \frac{d_i}{\frac{a}{A_B} - b_i}, \quad i = 1, 2, \quad (23)$$

где L_{Bi} — допускаемая длина очистного забоя по фактору проветривания.

Анализ выражения (22) позволяет сделать выводы о том, что оптимальная производительность очистного забоя, при которой достигается максимум годовой прибыли на шахте, нелинейно увеличивается с ростом цены угля и уменьшается с увеличением стоимости механизированного комплекса и ростом сопротивляемости угля резанию.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ОЧИСТНОГО КОМБАЙНА

Техническая производительность механизированного комплекса определяется с учетом коэффициента машинного времени, зависящего от надежности оборудования и простоев очистного забоя по организационным и технологическим причинам [34]:

$$A_{\text{тех}} = AK_M \mu k_K k_B k_o, \quad (24)$$

где A — теоретическая производительность КМЗ, определяемая по формулам (12), (13) в зависимости от принятой схемы работы комбайна; K_M — сменный коэффициент машинного времени очистного комбайна; μ — коэффициент готовности очистного забоя; k_K — коэффициент использования ширины захвата очистного комбайна; k_B — коэффициент, учитывающий вязкопластичность углей; k_o — коэффициент, учитывающий простои очистного забоя по плановым и организационным мероприятиям [34]:

$$k_o = \frac{T_{\text{и}}}{T_{\text{и}} + T_{\text{п}}} = \frac{T_{\text{см}} - T_{\text{п}}}{T_{\text{см}}} = 1 - K_{\text{п}} = 1 - \frac{t_{\text{пз}} + t_{\text{по}}}{T_{\text{см}}}, \quad (25)$$

где $T_{\text{и}}$, $T_{\text{п}}$ — соответственно суммарное время исправной работы и суммарное время простоев очистного комбайна по плановым и организационным мероприятиям в течение смены длительностью $T_{\text{см}}$; $K_{\text{п}}$ — коэффициент вынужденного простоя очистного комбайна по этим причинам; $t_{\text{пз}}$ — нормативные затраты времени на выполнение подготовительно-заключительных операций; $t_{\text{по}}$ — плановое время для перерыва на отдых (12 % от времени смены).

Сменный коэффициент машинного времени очистного комбайна включает в себя все виды простоев очистного забоя по технологическим факторам: организационные, плановые перерывы на отдых, а также все виды отказов шахтного оборудования, при которых прерывается ра-

бота очистного забоя. К этим отказам относятся: отставание от груди забоя секций механизированной крепи, отказы в работе лавного скребкового конвейера, перегружателя, дробилки, скребковых и ленточных конвейеров, перебои в энергоснабжении, простои по газовому фактору из-за отключения электрооборудования датчиками по метану и др.

Коэффициент готовности очистного забоя определяется для основного соединения элементов технологической цепи шахтного оборудования по формуле [36, 37]

$$\mu = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i}{\beta_i}} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{\mu_i} - 1 \right)}, \quad (26)$$

где N — количество звеньев технологической цепи; λ , β , μ — соответственно интенсивность отказов, восстановления и коэффициент готовности i -го вида оборудования в технологической цепи (очистного комбайна, лавного скребкового конвейера, механизированной крепи, перегружателя, дробилки, скребкового конвейера на конвейерном штреке, ленточных конвейеров на конвейерном штреке и наклонном стволе, бункеров и др.).

Если оборудование уже находилось в эксплуатации, то коэффициенты готовности корректируются на величину выработанного ресурса. Корректировка производится после каждого ремонта очистного оборудования. Коэффициент готовности с учетом выработанного ресурса предлагается определять по формуле [34]

$$\mu_i = 0.9^{R/20} \mu_{i0}, \quad (27)$$

где R — выработанный ресурс оборудования на момент пуска лавы в эксплуатацию, %; ($R = 0$ для нового оборудования); μ_{i0} — коэффициент готовности нового оборудования.

Коэффициент готовности очистного забоя по фактору проветривания принимается для шахт сверхкатегорных и III категории равным 0.93; для остальных — равным 1.

Таким образом, техническая производительность очистного забоя с учетом формул (24), (25) рассчитывается по зависимости

$$A_{\text{тех}} = AK_M = A \frac{k_B k_K}{1 + \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{0.9^{R/20} \mu_{i0}} - 1 \right)} \left(1 - \frac{t_{\text{пз}} + t_{\text{по}}}{T_{\text{см}}} \right). \quad (28)$$

ОПТИМИЗАЦИЯ ДЛИНЫ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОМПЛЕКСНО-МЕХАНИЗИРОВАННОГО ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ ШАХТЫ “КОСТРОМОВСКАЯ”

Шахта “Костромовская” введена в эксплуатацию в 2008 г. Поле шахты расположено в юго-западной части Ленинского геолого-экономического района Кемеровской области, в пределах Никитинского каменноугольного месторождения. Промышленные запасы добываемого угля марки Ж в принятых границах отработки составляют 24430 тыс. т.

Вскрытие осуществлено тремя центральными наклонными стволами, пройденными по пологому пласту 19 с присечкой пород почвы и разбивающими шахтное поле на два крыла: западное и восточное. На флангах шахтного поля пройдены западный и восточный наклонные стволы. Подготовка шахтного поля панельная: в каждом крыле — по односторонней уклонной панели. Добыча угля на шахте в 2011 г. составила 1.979 млн т при отработке пласта 19 механизированным комплексом JOY системой разработки — длинные столбы по простиранию с полным обрушением кровли.

В 2013 г. ЗАО “Типроуголь” выполняет проектирование по прирезке запасов угля и увеличению добычи угля на шахте “Костромовская” до 2700 тыс. т/год.

Исходные данные для оптимизации длины лавы шахты “Костромовская” по пласту 19 приведены в таблице, а результаты решения этой задачи показаны на рис. 4, 5.

Основные исходные данные шахты “Костромовская”

Горно-геологические показатели	
Наименование разрабатываемого пласта	19
Средняя вынимаемая мощность пласта, м	1.99
Угол падения пласта, град	5.0
Плотность горной массы, т/м ³	1.31
Марка угля	Ж
Средневзвешенная сопротивляемость угольного пласта резанию с учетом породных прослоек, кН/м	300.0
Технологические показатели	
Тип очистного комбайна	JOY 4LS20
Тип механизированной крепи	JOY RS2/725
Тип лавного скребкового конвейера	JOY тип AFC
Суммарная мощность электродвигателей очистного комбайна, кВт	703
Количество резцов в одной линии резания	3
Количество резцов, одновременно разрушающих забой	30
Диаметр шнека, м	1.425
Коэффициент отжима	0.56
Ширина захвата комбайна, м	0.8
Вес комбайна, кН	420
Маневровая скорость комбайна, м/мин	8.0
Длина косога заезда, м	20
Скорость движения комбайна при косом заезде, м/мин	2.0
Технико-экономические показатели	
Количество рабочих дней в году	314
Количество рабочих смен в сутки	3
Длительность рабочей смены, ч	6.0
Амортизационные отчисления на механизированный комплекс, тыс. руб./мес	14000
Стоимость механизированного комплекса JOY, млн руб.	840.0
В том числе: очистного комбайна	63.0
скребкового конвейера	86.0
механизированной крепи	580.0
Удельная стоимость скребкового конвейера, руб./м	371795
Удельная стоимость механизированной крепи, руб./м	2437635
Оптовая цена угля, руб./т	1700
Себестоимость добычи угля, руб./т	1600

Как следует из рис. 4, односторонняя схема движения комбайна вверх по лаве с зачисткой почвы обратным ходом имеет преимущество перед челноковой схемой до длины лавы 250 м. При длине лавы более 250 м преимущество по производительности у челноковой схемы работы очистного комбайна. При длине лавы 250 м эти схемы практически равноценны и производительность очистного забоя составляет в данном случае 3.0 млн т/год.

На рис. 5 представлены графики годовой прибыли и амортизационных отчислений на механизированный комплекс в зависимости от длины лавы при отработке пласта 19 шахты “Костромовская”. Как видно, при односторонней схеме работы очистного комбайна максимум годовой

прибыли (320–323 млн руб./год) достигается при длине лавы 175–225 м. При ограничении длины лавы по фактору проветривания не более 250 м оптимальной является односторонняя схема работы комбайна с производительностью очистного забоя 2800–3000 тыс. т/год.

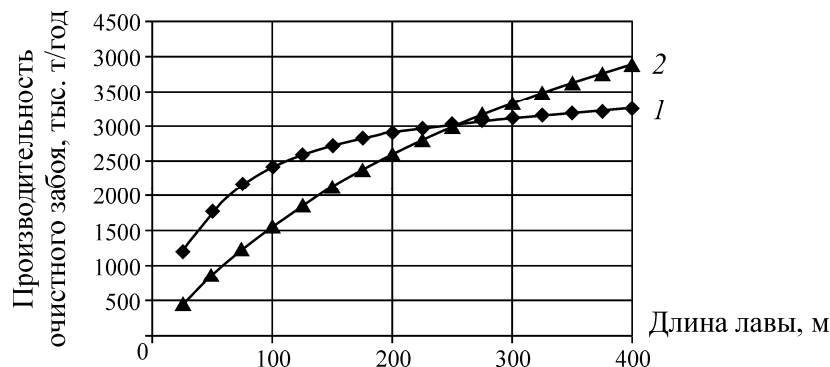


Рис. 4. Зависимость производительности очистного забоя шахты “Костромовская” по пласту 19 от длины лавы и схемы работы комбайна: 1 — односторонняя схема с отбойкой угля вверх по лаве; 2 — челноковая схема движения комбайна JOY 4LS20

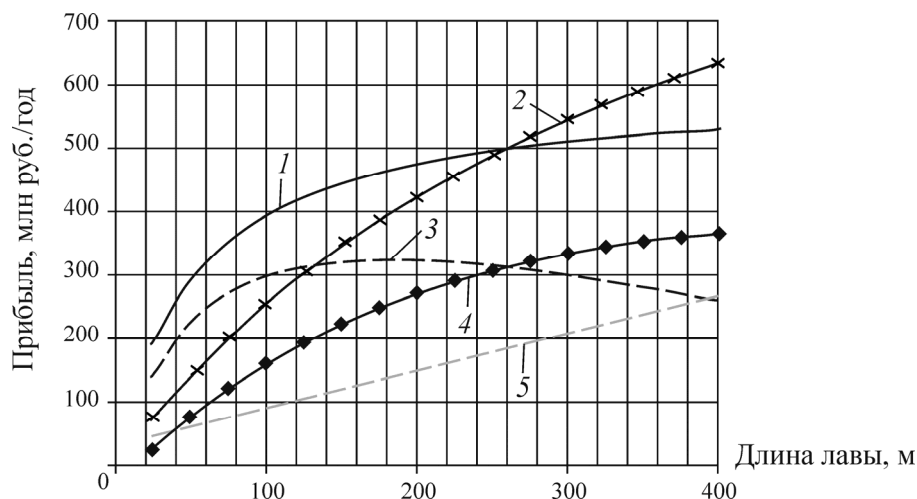


Рис. 5. Зависимость прибыли от длины лавы и схемы работы очистного комбайна по пласту 19 шахты “Костромовская”: 1 — прибыль при односторонней схеме (без амортизации); 2 — прибыль при челноковой схеме (без амортизации); 3 — прибыль при односторонней схеме; 4 — прибыль при челноковой схеме; 5 — амортизационные отчисления на комплекс

ВЫВОДЫ

1. Доказано существование оптимальной длины комплексно-механизированного очистного забоя, при которой достигается максимум годовой прибыли шахты. Полученные аналитические решения данной задачи показывают нелинейные зависимости оптимальной длины лавы от горно-геологических, технологических и технико-экономических показателей (марки, зольности, товарной цены угля, сопротивляемости пласта резанию, наличия породных прослоек и др.).

2. Поскольку в большинстве случаев шахта отрабатывает не один пласт, а свиту угольных пластов, обладающих различным качеством, задачу определения оптимальной длины лавы (даже при использовании того же самого комплекса) при переходе от отработки одного пласта к другому необходимо решать в каждом случае заново. Иначе говоря, не существует единст-

венного решения по обоснованию оптимальной длины лавы для данного вида комплекса, а длина лавы должна оптимизироваться для каждого угольного пласта и даже для отдельных выемочных столбов, если горно-геологические условия их залегания существенно различаются.

3. Раскройка шахтного поля на панели, ярусы, выемочные столбы, а также календарный план их отработки в значительной степени будут изменяться в соответствии с решением задачи оптимизации длин очистных забоев для каждого пласта свиты.

4. Результаты, полученные в данной работе, представляют первый этап исследований, проводимых Институтом горного дела СО РАН совместно с ЗАО “Гипроуголь”. Планируется расширить данную постановку и перейти к решению более общей задачи совместной оптимизации длины лавы и выемочного столба шахты, а также производительности комплексно-механизированного очистного забоя на основе лагового моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Burger K. E., Ericsson E.** The optimization of coal mine production schedules using linear programming: an example that determines the effects of reclamation costs and interest rates, *Mining Sci. and Technol.*, 1984, No. 1.
2. **Lizotte Y., Elbrond J.** Choice of mine-mill capacities and production schedules using open-ended dynamic programming, *CIM Bull.*, 1982, Vol. 75, March.
3. **Corbyn J. A.** Optimum life of a resource depleting project, *Mining Engineering*, 1985, No. 3.
4. **Sturgul J. R.** Optimum life of mine: declining production case, *Int. J. Mining Engineering*, 1985, No. 3.
5. **Li Z.** A theoretical approach to determination of mine life and design capacity, *Int. J. Surf. Mining*, 1989, Vol. 3.
6. **Fuentes S. S.** Going to an underground mining method. *Proceedings of Mass Min. Conf. Santiago, Chile*, 2004.
7. **Димитракопулос Р.** Стохастическая оптимизация стратегического проектирования шахт: десятилетие разработок и исследований // ФТПРПИ. — 2011. — № 2.
8. **Бокий Б. И.** Практический курс горного искусства. — СПб., 1914.
9. **Бокий Б. И.** Аналитический курс горного искусства. — М., 1929.
10. **Шевяков Л. Д.** Основы проектирования угольных шахт. — М.: Углетехиздат, 1958.
11. **Липкович С. М.** Основы проектирования угольных шахт. — М.: Недра, 1967.
12. **Звягин П. З.** Современные методы проектирования угольных шахт. — М., 1968.
13. **Курносое А. М., Розентретер Б. А., Устинов М. И. и др.** Научные основы проектирования угольных шахт для разработки пологих пластов. — М.: Наука, 1964.
14. **Цой С., Цхай С. М.** Прикладная теория графов. — Алма-Ата: Наука, 1971.
15. **Рогов Е. И.** Теория и методы математического моделирования производственных процессов в горном деле. — Алма-Ата: Наука, 1973.
16. **Рогов Е. И., Грицко Г. И., Вылегжанин В. Н.** Математические модели адаптации процессов и подсистем угольной шахты. — Новосибирск: Наука, 1979.
17. **Адилов К. Н.** Совершенствование технологии подземной разработки пластовых месторождений. — М.: Недра, 1979.
18. **Астахов А. С.** Динамические методы оценки эффективности горного производства. — М.: Недра, 1973.
19. **Дронов Н. В.** Оптимизация горно-экономических параметров рудников. — Фрунзе: Илим, 1982.
20. **Штеле В. И., Кусиньш Я. Я., Корнеев В. П.** Моделирование организации работ в подземных забоях. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1987.
21. **Вылегжанин В. Н.** Важнейшие аналитические соотношения параметров шахты // Совершенствование технологии отработки угольных месторождений Кузбасса. — Кемерово, 1991. — Вып. 2.

22. **Стрекачинский Г. А.** Теория и численные модели вскрытия месторождений. — Новосибирск: Наука, 1983.
23. **Горбачев Д. Т., Крашкин И. С., Саламатин А. Г.** К вопросу применения многоштрекового способа подготовки выемочных полей на перспективных шахтах // Уголь. — 1997. — № 6.
24. **Ялевский В. Д.** Разработка концепции создания крупных угольных технологических модульных комплексов в Кузбассе: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 1988.
25. **Федорин В. А.** Разработка модульных горно-технологических структур вскрытия и подготовки шахтных полей Кузнецкого бассейна: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Кемерово: ИУ СО РАН, 2000.
26. **Ордин А. А.** Аналитическое решение задачи оптимизации длины комплексно-механизированного очистного забоя // Вопросы совершенствования горных работ на шахтах и карьерах Сибири — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1990.
27. **Кодола В. В., Ордин А. А.** Оптимизация технологических параметров при проектировании участка подземных горных работ на действующем разрезе “Сибиргинский” // Уголь. — 2000. — № 8.
28. **Ордин А. А., Клишин В. И.** О рентабельной производительности комплексно-механизированного очистного забоя // ФТПРПИ. — 1996. — № 6.
29. **Ордин А. А., Зырянов С. А., Никольский А. М. и др.** Основные закономерности расчета производительности комплексно-механизированных очистных забоев по технологическим факторам в программном комплексе “Проза-3.0” // Сб. науч. статей Междунар. науч.-практ. конф. “Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов”. — Новокузнецк, 2012.
30. **Коровкин Ю. А., Савченко П. Ф., Бураков В. А.** О производительности комплексно-механизированных забоев, оснащаемых по инвестиционным проектам договорам лизинга // Уголь. — 2001. — № 5.
31. **Плотников В. П.** Вывод формулы для расчета производительности очистных комбайнов со шнековым, барабанным или корончатым исполнительным органом // Уголь. — 2009. — № 9.
32. **Местер Д. И.** Совершенствование методов расчета нагрузок очистных забоев при организационных ресурсах на основе эвристической самоорганизации поиска оптимальных решений: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Караганда, 1982.
33. **Лившиц В. Н.** Оптимизация при перспективном планировании и проектировании. — М.: Экономика, 1984.
34. **Малеев Г. В., Гуляев В. Г., Бойко Н. Г. и др.** Проектирование и конструирование горных машин и комплексов — М.: Недра, 1988.
35. **Александров Б. А., Кожухов Л. Ф., Антонов Ю. А. и др.** Горные машины и оборудование подземных разработок. — Кемерово: КузГТУ, 2006.
36. **Косьминов Е. А., Ремезов А. В., Ордин А. А., Клишин В. И.** Автоматизированный поиск рентабельной производительности комплексно-механизированного очистного забоя // Уголь. — 1997. — № 10.
37. **Половко А. М., Гуров С. В.** Основы теории надежности. — СПб., 2006.

Поступила в редакцию 15/II 2013