РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

2019 № 2

УДК 622.33.013.3

АНАЛИЗ ЧЕЛНОКОВОЙ И УСТУПНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКИ МОЩНЫХ МЕТАНОНОСНЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

А. А. Ордин[1,2], А. М. Тимошенко[3], Д. В. Ботвенко[3], А. А. Мешков[4], М. А. Волков[4]

[1]Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: ordin@misd.ru, *Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*
[2]ООО "НПЦ ВостНИИ", ул. Институтская, 1, 650002, г. Кемерово, Россия
[3]АО "НЦ ВостНИИ", ул. Институтская, 3, 650002, г. Кемерово, Россия
[4]АО "СУЭК-Кузбасс", ул. Васильева, 1, 652507, г. Ленинск-Кузнецкий, Россия

Приведены исследования по обоснованию производительности очистного забоя шахты "Талдинская-Западная-1" с учетом технических параметров шнекового комбайна и пропускной способности лавного скребкового конвейера при отработке мощного метаноносного угольного пласта. Выявлено снижение метановыделения при увеличении производительности очистного комбайна и определена допускаемая длина и производительность очистного забоя по газовому фактору. Рассчитаны оптимальные длины очистного забоя 6605 по условию максимума годовой прибыли шахты.

Шахта, угольный пласт, мощность, челноковая, уступная, технологические схемы, очистной комбайн, цикл, скорость подачи, производительность, скребковый конвейер, дебит и концентрация метана

DOI: 10.15372/FTPRPI20190211

Проблема эффективной подземной разработки мощных пологих, наклонных и крутопадающих угольных пластов исследуется в России и во многих угледобывающих странах мира: Австралии, Индии, Канаде, Китае, США, ЮАР [1 – 9]. Основным направлением для эффективной разработки таких пластов считается использование длинностолбовой системы с применением механизированных комплексов. Научно-исследовательские и проектно-конструкторские работы ведутся в следующих направлениях: разработка пластов на полную мощность очистными комбайнами с увеличенным диаметром шнеков; слоевая система разработки с оставлением в выработанном пространстве защитной межслоевой пачки пласта; отработка пластов с выпуском подкровельной толщи на завальный скребковый конвейер.

Энерговооруженность очистных комбайнов при отработке мощных пластов за последние 30 лет выросла в 15 – 20 раз [10]. Так, в Германии фирма "Eickhoff Bergbautechnik GmbH" выпускает очистной комбайн SL1000 с мощностью электродвигателей 2800 кВт, диаметром шнеков 4.3 м, массой 110 т и скоростью подачи до 41 м/мин для отработки пластов с максимальной мощностью до 8.6 м [10 – 12]. В настоящее время этот очистной комбайн поставлен на китайскую шахту "Shenhua Energy" для отработки пласта мощностью 6.2 м. Американская компания

“Joy Mining Machinery” изготовила очистные комбайны моделей 7LS7 и 7LS8 с мощностями электродвигателей соответственно 2345 и 2500 кВт. Максимальные диаметры шнеков в этих комбайнах составляют 3.6 и 3.9 м. Очистной комбайн 7LS8 позволяет отрабатывать пласт мощностью до 8.17 м [10]. Снижение энергозатрат в высокопроизводительных очистных забоях и поиск рациональных технологических схем отработки мощных угольных пластов является актуальной задачей.

При отработке мощных угольных пластов с применением высокопроизводительных очистных комбайнов на шахтах обычно применяются челноковая или уступная технологические схемы. При использовании челноковой схемы пласт вынимается на полную мощность двумя шнеками с косыми заездами комбайна в конце отработки каждой ленты. При уступной технологии сначала вынимается верхний слой пласта, мощностью соответствующей диаметру шнека, при движении комбайна вверх по очистному забою, а затем отрабатывается нижний слой пласта при обратном движении комбайна с одновременной зачисткой почвы. Общая закономерность заключается в том, что с увеличением вынимаемой мощности m пласта скорость подачи очистного комбайна уменьшается, а его производительность нелинейно возрастает [13]. При использовании уступной технологической схемы скорость подачи очистного комбайна возрастает по сравнению со скоростью подачи при челноковой схеме, так как мощность вынимаемого верхнего слоя пласта соответствует диаметру шнека D и составляет только часть мощности пласта $D < m$.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Техническая производительность очистного комбайна при челноковой схеме отработки пласта является возрастающей гиперболической зависимостью от мощности пласта m и длины лавы L, а также зависит от угла падения пласта, уменьшаясь при движении комбайна вверх по лаве и увеличиваясь при движении комбайна вниз по лаве [13]. С учетом этого техническую производительность очистного комбайна при челноковой схеме следует определить при отработке двух лент с двумя косыми заездами:

$$A_1(m,L) = \frac{2Q}{T_{11}+T_{12}+2T_k} = \frac{2\gamma mrL}{\dfrac{L}{v_{11}(m)}+\dfrac{L}{v_{12}(m)}+2T_k} = \frac{2\gamma mr}{v_{11}^{-1}(m)+v_{12}^{-1}(m)+\dfrac{2k_y}{L}\left(\dfrac{3L_k}{v_k}+\dfrac{r}{v_{fk}}\right)}, \qquad (1)$$

где Q — промышленные запасы угля в одной ленте, т; L — длина лавы, м; γ — средняя плотность угольной массы, т/м^3; r — ширина захвата комбайна, м; T_{11}, T_{12} — время одного цикла при движении комбайна соответственно вверх и вниз по лаве, мин; T_k — время косого заезда комбайна, мин; $k_y = 1.0-1.3$ — коэффициент организации труда на концевых операциях; L_k — длина косого заезда, м; v_k — скорость подачи комбайна при косом заезде, м/мин; v_{fk} — скорость фланговой передвижки концевого участка скребкового конвейера, м/мин; $v_{11}(m)$, $v_{12}(m)$ — скорость подачи очистного комбайна при его движении соответственно вверх и вниз по лаве в зависимости от вынимаемой мощности пласта:

$$v_{11}(m) = \frac{30N\eta n_1 K_1}{fP\cos\alpha + P\sin\alpha + Smn_2K_o(m)K}, \qquad (2)$$

$$v_{12}(m) = \frac{30N\eta n_1 K_1}{fP\cos\alpha - P\sin\alpha + Smn_2K_o(m)K}.$$

Здесь N — суммарная мощность электродвигателей очистного комбайна, кВт; η — КПД редуктора исполнительного органа; n_1 — количество резцов на лопастях шнека комбайна в одной линии резания; K_1 — коэффициент, учитывающий затраты мощности на перемещение комбайна; f — коэффициент трения скольжения между комбайном и конвейером; P — вес комбайна, кН; α — угол падения пласта, град; S — средневзвешенная сопротивляемость пласта угля резанию, кН/м; n_2 — количество резцов, одновременно разрушающих пласт; $K = K_\alpha K_b K_p K_f$ — коэффициенты, учитывающие угол резания, ширину резца, затупление и форму резцов соответственно; $K_o(m)$ — коэффициент отжима, который зависит от марки угля, мощности пласта и ширины захвата комбайна:

$$K_o(m) = K' + \frac{r - k_1 m}{r + k_2 m}, \tag{3}$$

где K' — коэффициент отжима на поверхности забоя (для Кузнецких углей марок К, Ж, ОС, Т, А $K' = 0.35$; для марок Г, Д $K' = 0.45$, $k_1 = 0.1$, $k_2 = 1$) [14].

При уступной технологии после отработки верхнего уступа при движении комбайна вверх по лаве сразу отрабатывается нижний уступ при работе комбайна вниз по лаве. Косой заезд осуществляется один раз в нижней части лавы, и техническая производительность очистного комбайна при отработке каждой ленты рассчитывается по формуле

$$A_2(m, m-D, L) = \frac{Q}{T_{21} + T_{22} + T_k} = \frac{\gamma m r}{v_{21}^{-1}(D) + v_{22}^{-1}(m-D) + \dfrac{k_y}{L}\left(\dfrac{3L_k}{v_k} + \dfrac{r}{v_{fk}}\right)}, \tag{4}$$

где скорости подачи очистного комбайна определяются в зависимости от мощностей верхнего $(m_{21} = D)$ и нижнего $(m_{22} = m - D)$ уступов:

$$v_{21}(D) = \frac{30 N \eta n_1 K_1}{fP\cos\alpha + P\sin\alpha + SDn_2 K_o(m) K}, \tag{5}$$

$$v_{22}(m-D) = \frac{30 N \eta n_1 K_1}{fP\cos\alpha - P\sin\alpha + S(m-D)n_2 K_o(m) K}.$$

Таким образом, в качестве критерия оптимальности рассматриваемых технологических схем необходимо найти максимум технической производительности очистного комбайна:

$$\max\left\{A_1(m,L), A_2(D, m-D, L)\right\} = \max\left\{\frac{2\gamma m r}{v_{11}^{-1}(m) + v_{12}^{-1}(m) + \dfrac{2T_k}{L}}; \frac{\gamma m r}{v_{21}^{-1}(D) + v_{22}^{-1}(m-D) + \dfrac{T_k}{L}}\right\} \tag{6}$$

при соблюдении ограничения по допускаемой концентрации метана на исходящей струе воздуха из очистного забоя:

$$c = \frac{100 Q_M(X, m, L, v(m))}{Q_{\text{в}}(L)} \le [c], \tag{7}$$

где Q_M — дебит метана из отбитого угля, м^3/мин; $X = X_{\text{с}} + X_{\text{св}}$ — природная метаноносность разрабатываемого пласта, м^3/т, $X_{\text{с}}$, $X_{\text{св}}$ — соответственно объем сорбированного и свободного метана в угле, м^3/т; c — концентрация метана на исходящей струе из очистного забоя, %; $[c] = 1.0$ % — допускаемая концентрация метана на исходящей струе; $Q_{\text{в}}$ — количество воздуха, проходящего через очистной забой в единицу времени на исходящей струе, м^3/мин.

При уступной технологии количество резцов, принимающих участие в резании пласта, зависит от мощности вынимаемого слоя. При выемке верхнего слоя пласта, мощностью соответствующей диаметру шнека, это количество резцов, как и для челноковой схемы, составляет половину всех резцов на шнеке. При выемке нижнего уступа количество резцов, одновременно участвующих в резании, определяется по формулам:

$$\text{если } m_2 > R, \quad n_2' = \frac{n_2 l}{\pi} = \frac{n_2}{\pi}\left(\frac{\pi}{2} + \arcsin\left(\frac{m-R}{R}\right)\right), \tag{8}$$

$$\text{если } m_2 < R, \quad n_2' = \frac{n_2}{\pi}\arccos\left(\frac{R-m}{R}\right),$$

$$\text{если } m_2 = R, \quad n_2' = 0.5 n_2,$$

где l — длина дуги шнека при отработке нижнего уступа мощностью $m_2 = m - D$; $R = 0.5D$ — радиус шнека.

В качестве критерия при выборе челноковой или уступной технологических схем может также использоваться суточная добыча угля из очистного забоя:

$$A_{ci}(L) = 60 n_{\text{см}}(T_{\text{см}} - T_p) A_i(L) = 60 n_{\text{см}} T_{\text{см}} K_M A_i(L) \to \max \ \ (i = 1, 2), \tag{9}$$

где $n_{\text{см}}$, $T_{\text{см}}$ — соответственно количество рабочих смен в сутки и длительность рабочей смены, ч; T_p — время регламентированных перерывов в рабочую смену, мин; $K_M < 1$ — коэффициент машинного времени.

МЕТАНОВЫДЕЛЕНИЕ ИЗ ОТБИТОГО УГЛЯ

Дебит метана из отбитого угля рассчитывается в зависимости от его фракционного состава, который, в свою очередь, зависит от кинематических параметров очистного комбайна — скорости подачи и частоты вращения шнека:

$$Q_M(v(m)) = qmL + \frac{720 m_{ij} r k_1 (0.9X(1 + bP_a) - abP_a)}{\mu b(a - 0.9X)\left(\dfrac{v(m)}{(\pi n n_p)^2} + \dfrac{h_p}{\pi n n_p} + \dfrac{0.25 h_p^2}{v(m)}\right)}, \tag{10}$$

где q — удельное метановыделение из пласта, м^3/(м^2·мин); a, b — постоянные изотермы Ленгмюра, для угля определяемые по [16]: $a = 49.3$ м^3/т, $b = 0.207 \cdot 10^{-6}$ 1/Па; k_1 — коэффициент проницаемости угля, м^2; P_a — атмосферное давление в забое, Па; μ — абсолютная вязкость среды на пути фильтрации метана, Па·с; h_p — расстояние между резцами на лопастях шнека, м; n — частота вращения шнека, 1/мин; n_p — количество резцов в одной линии резания; $v(m)$ — зависимость скорости подачи очистного комбайна от мощности (слоя) пласта, определяемая по (2) для челноковой и по (5) для уступной технологических схем [15].

В знаменателе (10) находится сумма линейной и гиперболической зависимостей от скорости подачи $v(m)$ очистного комбайна, которая имеет точку минимума. Следовательно, функция метановыделения (10) имеет точку максимума относительно скорости подачи комбайна и при дальнейшем увеличении скорости метановыделение начинает уменьшаться вследствие изменения фракционного состава угля.

Сравнительный анализ челноковой и уступной технологических схем по приведенной методике выполнен для условий шахты “Талдинская-Западная-1”, которая входит в ОАО “СУЭК-Кузбасс” и находится в Прокопьевском районе Кемеровской области. Поле шахты расположено в центральной части Ерунаковского геолого-промышленного района Кузбасса и является частью

Талдинского и Северо-Талдинского каменноугольных месторождений. Уголь разрабатываемого пласта 66 — энергетический, марка угля — Д. Уголь склонен к самовозгоранию с инкубационным периодом 62 сут. Вынимаемая мощность пласта — 4.5 м. Для отработки пласта на шахте используется механизированная крепь DBT 2200/4800, очистной комбайн 7LS6C "JOY" и лавный скребковый конвейер PF 6/1142 "DBT". По проекту принята длина лавы 300 м. Расход воздуха на исходящей струе в лаве 6605 составляет 999 м^3/мин.

По уступной технологии мощный пласт 66 делится на два уступа. Верхний мощностью 2.25 м отрабатывается комбайном при движении вверх по лаве, нижний мощностью 2.25 м — комбайном при движении вниз по лаве с одновременной зачисткой почвы пласта. Косой заезд комбайна осуществляется один раз за цикл в нижней части лавы.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОЧИСТНОГО КОМБАЙНА

Результаты расчета технической производительности комбайна 7LS6C "JOY" при коэффициенте машинного времени, равном единице, представлены в таблице. Максимальная скорость подачи очистного комбайна при отработке пласта 66 определена по (5) и составляет 19 м/мин при отработке верхнего уступа и 20 м/мин при отработке нижнего уступа. После расчета скоростей подачи очистного комбайна при отработке верхнего и нижнего уступов определяется время цикла с учетом концевых операций в нижней части лавы и количество циклов в сутки. Расчетная зависимость дебита метана от скорости подачи очистного комбайна вычислена по (10) и приведена на рис. 1.

Сравнительный анализ челноковой и уступной технологических схем при отработке очистного забоя 6605 шахты "Талдинская-Западная-1"

Технологические параметры	Расчетные показатели для технологических схем		Фактические показатели работы забоя
	челноковой	уступной	
Скорость подачи комбайна 7LS6C при движении по лаве, м/мин:			
вверх	9.83	19.24	
вниз	10.04	20.05	
Средняя скорость подачи комбайна, м/мин	9.94	19.65	6.79
Производительность комбайна 7LS6C при движении по лаве, т/мин:			
вверх	50.97	48.75	
вниз	52.06	53.14	
Средняя производительность комбайна, т/мин	51.51	50.94	35.19
Время цикла при движении комбайна по лаве, мин:			
вверх	42.31	15.60	
вниз	41.68	26.76	
Среднее время цикла, мин	41.99	42.36	56.00
Количество циклов в сутки	25.70	25.50	19.30
Суточная добыча угля, т/сут	55633	55020	38000
Средний диаметр куска угля, мм	50.50	74.80	25.00
Дебит метана, м^3/мин	7.80	4.50	9.00
Концентрация метана на исходящей струе, %	0.78	0.45	0.90

Анализ расчетных и фактических показателей работы очистного забоя 6605 показывает преимущества уступной технологический схемы по сравнению с челноковой:

— скорость подачи очистного комбайна увеличивается с 9.9 до 19.6 м/мин при практически одинаковой производительности 51.5 и 50.9 т/мин и суточной добыче угля 55633 и 55020 т/сут;

— средний диаметр куска угля увеличивается с 50 до 75 мм вследствие увеличения скорости подачи комбайна;

— в связи с увеличением крупности отбитого угля снижается дебит и концентрация метана на исходящей струе соответственно 7.8 – 4.5 м^3/мин и 0.78 – 0.45 %.

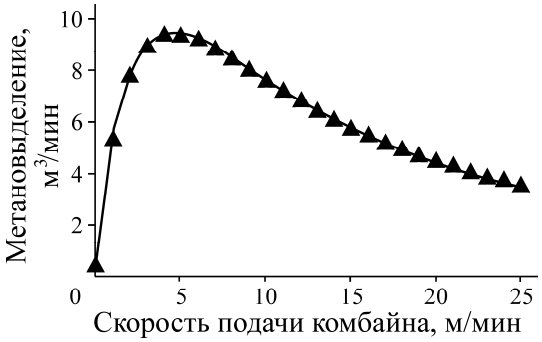

Рис. 1. Зависимость метановыделения от скорости подачи очистного комбайна 7LS6C

Фактические показатели работы очистного забоя 6605 в 2016 г. продемонстрировали, что при достигнутой суточной добыче угля 38000 т коэффициент машинного времени составил $K_M = 0.69$, средняя скорость подачи и производительность комбайна составили соответственно 6.8 м/мин и 35.2 т/мин. При этом средний диаметр куска угля равен 25 мм, а дебит и концентрация метана на исходящей струе соответственно составили 9.0 м^3/мин и 0.9 %.

ОПТИМИЗАЦИЯ ДЛИНЫ ЛАВЫ

Расчет оптимальной длины лавы шахты “Талдинская-Западная-1” выполнен для уступной технологической схемы по условию максимума годовой прибыли, которая представляет собой разность между возрастающей гиперболической функцией годового дохода шахты и линейной функцией амортизационных отчислений на механизированный комплекс [13] и имеет точку максимума относительно длины лавы:

$$P(m,L) = \frac{60 n_{\text{см}} T_{\text{см}} K_M z n_1 \gamma m r n_p}{v_{21}^{-1}(D) + v_{22}^{-1}(m-D) + \dfrac{k_y}{L}\left(\dfrac{3L_k}{v_k} + \dfrac{r}{v_{fk}}\right)} -$$

$$-C_o - H_o K_o - (H_k k_k + H_{\text{c}} k_{\text{c}}) L \to \max, \qquad (11)$$

где z — оптовая цена 1 т угля, зависящая от марки угля и его качества, руб./т; n_p — количество рабочих дней в году; C_o — постоянные общешахтные расходы на зарплату, материалы и электроэнергию, не зависящие от длины очистного забоя, 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.

Результаты расчета годовой прибыли (в условных единицах) в зависимости от длины лавы 6605 приведены на рис. 2. Видно, что максимумы годовой прибыли достигаются при оптимальных длинах лавы от 300 до 400 м в зависимости от организации очистных работ.

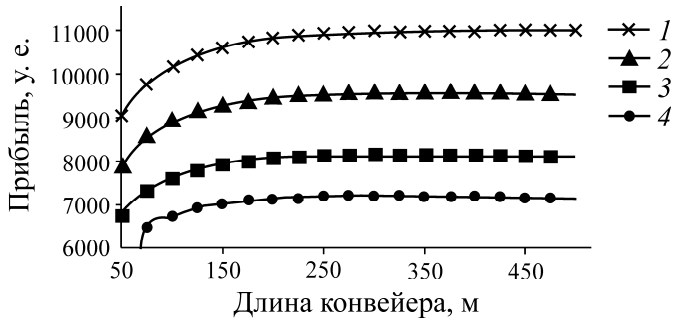

Рис. 2. Зависимость годовой прибыли шахты “Талдинская-Западная-1” от длины лавы при различных режимах очистных работ: *1* — 3 смены по 8 ч; *2* — 2.25 смены по 8 ч; *3* — 3 смены по 7 ч; *4* — 2 смены по 8 ч

ОЦЕНКА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЗАБОЙНОГО СКРЕБКОВОГО КОНВЕЙЕРА

Расчетная производительность скребкового конвейера PF 6/1142 определяется по формуле

$$Q = 60Fk(\alpha)\gamma v = 60(bh\psi + 0.25b^2 \mathrm{tg}\varphi)k(\alpha)\gamma v\,, \qquad (12)$$

где F — площадь поперечного сечения горной массы на конвейере, м^2; v — скорость движения цепи и скребков конвейера, м/с; γ — насыпная плотность горной массы на конвейере, т/м^3; $k(\alpha)$ — коэффициент использования желоба рештаков, учитывающий уменьшение объема горной массы на рештаке при увеличении угла наклона α конвейера; b — ширина рештака, м; h — высота рештака, м; $\psi = 0.7 - 0.8$ — коэффициент заполнения рештаков конвейера для плохосыпучей горной массы, φ — угол естественного откоса насыпной горной массы на конвейере [16, 17].

Зависимость коэффициента использования желоба конвейера от угла наклона описывается параболической зависимостью (с коэффициентом аппроксимации $R^2 = 0.991$):

$$k(\infty) = -0.0002\infty^2 - 0.0006\infty + 0.7479\,. \qquad (13)$$

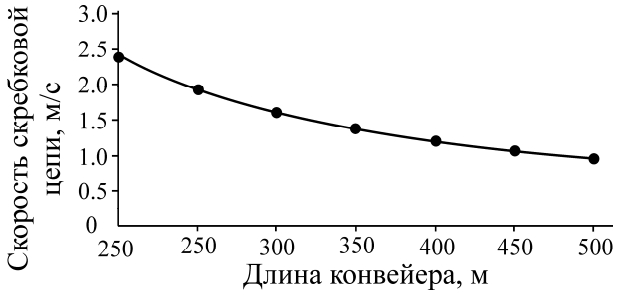

Рис. 3. Зависимость скорости движения скребковой цепи от длины конвейера PF 6/1142

Фактическая скорость движения цепи и скребков конвейера PF 6/1142 находится в зависимости от мощности конвейера, его длины и угла падения пласта (рис. 3):

$$v = \frac{102N\eta}{1.1L(2q_0 f_1 \cos\alpha + q_g(f_2 \cos\alpha \pm \sin\alpha))}\,, \qquad (14)$$

где N — мощность привода конвейера, кВт; $\eta = 0.8 - 0.95$ — КПД привода скребкового конвейера; L — длина конвейера, м; $q_g = 1000F\gamma\psi$ — расчетная погонная масса груза на конвейере, кг/м; q_0 — погонная масса цепи со скребками, кг/м (принимается по справочным данным или ори-

ентировочно по формуле $q_0 \approx kq_g$, где $k = 0.6 - 0.8$ — для двухцепных конвейеров); $f_1 = 0.2 - 0.35$ — коэффициент трения между цепью и рештаком; $f_2 = 0.35 - 0.60$ — коэффициент трения между насыпной горной массой и рештаком [16]. Знак "+" применяется при транспортировании угля по восстанию, знак "–" — по падению пласта.

Результаты расчета пропускной способности скребкового конвейера PF 6/1142 в зависимости от длины лавы приведены на рис. 4.

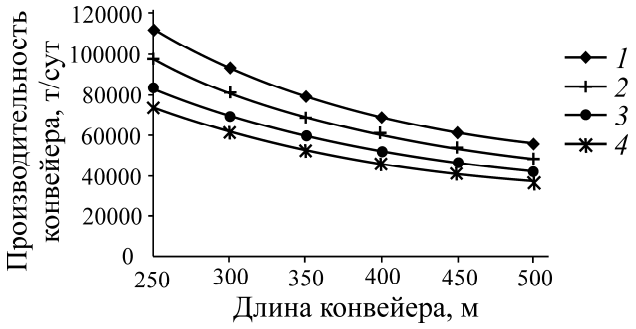

Рис. 4. Зависимость производительности скребкового конвейера PF6/1142 от его длины и организации очистных работ, т/сут: *1* — 3 смены по 8 ч; *2* — 3 смены по 7 ч; *3* — 2.25 смены по 8 ч; *4* — 2 смены по 8 ч

Таким образом, по пропускной способности скребкового конвейера PF 6/1142 допускается рост производительности очистного забоя 6605 до 69800 т/сут при режиме очистных работ 2.25 рабочие смены по 8 ч.

ВЫВОДЫ

Анализ расчетных и фактических показателей работы очистного забоя шахты "Талдинская-Западная-1" показывает преимущества уступной технологический схемы по сравнению с челноковой.

Пропускная способность лавного скребкового конвейера PF 6/1142 позволяет повысить производительности очистного забоя при его длине 300 м до 69800 т/сутки. Оптимизация длины очистного забоя 6605 по критерию максимума годовой прибыли шахты "Талдинская-Западная-1" при различной организации очистных работ приводит к оптимальной области практически равноценных длин лавы от 300 до 400 м. Фактическая длина 300 м лавы 6605 при ведении очистных работ в 2.25 рабочие смены по 8 ч близка к оптимальному значению 330 м.

Основное преимущество уступной технологической схемы перед челноковой заключается в существенном увеличении скорости подачи очистного комбайна вследствие уменьшения вынимаемой мощности уступов. Это приводит к увеличению крупности отбитого угля и, как следствие, к снижению дебита и концентрации метана на исходящей струе из очистного забоя, а также к повышению оптовой цены угля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Саламатин А. Г.** Подземная разработка мощных пологих угольных пластов. — М.: Недра, 1997. — 407 с.
2. **Томашевский Л. П., Петров А. И., Михеев О. В., Шахурдин С. А.** Технология разработки мощных крутых пластов (теория, эксперимент, практики). — Прокопьевск, 1997. — 544 с.
3. **Хвещук Н. М., Штумпф Г. Г., Сидорчук В. В., Махраков И. В., Малютин В. Ю., Осколков И. Г.** Совершенствование и повышение эффективности разработки мощных пологих и наклонных угольных пластов. — Кемерово: Кузбассвузиздат, 2001. — 199 с.

4. **Кулаков В. Н.** Создание технологий выемки мощных крутых угольных пластов: автореф. дис. … д-ра техн. наук. — Новосибирск, 1999.
5. **Клишин С. В.**, **Клишин В. И., Опрук Г. Ю.** Моделирование процесса выпуска угля при механизированной отработке мощных крутопадающих угольных пластов // ФТПРПИ. — 2013. — № 6. — С. 105–116.
6. **Michalakopoulos T. N., Roumpos C. P., Galetakis M. J., and Panagiotou G. N.** Discrete-event simulation of continuous mining systems in multi-layer lignite deposits, Lecture Notes in Production Engineering, Proc. 12th Int. Symp. Continuous Surface Mining, 2015. — P. 225–239.
7. **Gao Y., Liu D., Zhang X., and He M.** Analysis and optimization of entry stability in underground longwall mining, Sustainability, 2017, Vol. 9, No. 11. — P. 2079.
8. **Snopkowski R., Napieraj A., and Sukiennik M.** Method of the assessment of the influence of longwall effective working time onto obtained mining output, Archives of Mining Sciences, 2017, Vol. 61, No. 4. — P. 967–977.
9. **Димитракопулос Р.** Стохастическая оптимизация стратегического проектирования шахт: десятилетие разработок и исследований // ФТПРПИ. — 2011. — № 2. — С. 5–17.
10. **Александров Б. А., Кожухов Л. Ф., Антонов Ю. А., Хорешок А. А., Цехин А. М., Показаньев С. Г.** Горные машины и оборудование подземных разработок. — Кемерово: КузГТУ, 2016. — 83 с.
11. **Морозов В. И., Чуденков В. И., Сурина Н. В.** Очистные комбайны: справочник. — М.: МГГУ, 2006. — 650 с.
12. https://www.eickhoff-bochum.de/ru.
13. **Методическое обеспечение** программы “ПРОЗА-5.0” имитационного моделирования и оптимизации технологических параметров очистных работ длинностолбовой системы разработки пологих и наклонных метаноносных угольных пластов. — Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2018. — 151 с.
14. **Временные указания** по управлению горным давлением в очистных забоях на пластах мощностью до 3.5 м и углом падения до 35°. — Л.: ВНИМИ, 1982. — 136 с.
15. **Ордин А. А., Тимошенко А. М.** Нелинейные зависимости метановыделения от природной метаноносности угольного пласта и кинематических параметров резцов очистного комбайна // ФТПРПИ. — 2017. —№ 2. — С. 110–116.
16. **Кондрашин Ю. А., Колояров В. К., Ястремский С. И., Меграбян Г. Г., Саетов Н. Н., Щадов В. М.** Рудничный транспорт и механизация вспомогательных работ. — М.: Горная книга, 2010. — 534 с.
17. **Мусияченко Е. В.** Расчет и проектирование машин непрерывного транспорта. — Красноярск: СФУ, 2009. — 234 с.

Поступила в редакцию 26/II 2019
После доработки 26/II 2019
Принята к публикации 26/III 2019