

УДК 622.33.013.3

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ
ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ОТРАБОТКЕ МОЩНОГО МЕТАНОНОСНОГО УГОЛЬНОГО ПЛАСТА
НА СОКОЛОВСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ КУЗБАССА**

А. А. Ордин¹, А. М. Тимошенко², Д. В. Ботвенко², А. А. Мешков³, М. А. Волков³

¹*Институт вычислительных технологий СО РАН, E-mail: ordin@misd.ru,
просп. Лаврентьева, 6, 630090, г. Новосибирск, Россия*

²*АО “НЦ ВостНИИ”, ул. Институтская, 3, 650002, г. Кемерово, Россия*

³*АО “СУЭК-Кузбасс”, ул. Васильева, 1, 652507, г. Ленинск-Кузнецк, Россия*

Решена задача обоснования технической возможности и экономической целесообразности увеличения длины лавы 5003 шахты им. В. Д. Ялевского до 400 м и производительности до 70 тыс. т/сут при отработке мощного угольного пласта. Установлено, что по условию максимума годовой прибыли шахты оптимальное значение длины лавы составляет 450 м, при этом равноценными вариантами являются длины лавы от 400 до 512 м. Проведенные расчеты по метановыделению показывают, что при данной длине и производительности очистного забоя прогнозируется на исходящей струе концентрация метана 0.53 % и отсутствие ограничения по газовому фактору.

Шахта, угольный пласт, фракционный состав, сорбция, метановыделение, скорость подачи, производительность, очистной комбайн

DOI: 10.15372/FTPRPI20180410

В 2017 г. объем добычи угля в Кузбассе достиг рекордной величины 241 млн т, из них 85 млн т — подземным способом. Крупнейшей угольной компанией является ОАО “СУЭК-Кузбасс”, ведущее место в которой занимает шахта им. В. Д. Ялевского. Шахта им. В. Д. Ялевского отрабатывает мощные пологие пласты Соколовского угольного месторождения. Она отнесена к сверхкатегорной по метану, природная метаноносность углей составляет 17.55 м³/т. Поставлена задача обосновать техническую возможность и экономическую целесообразность увеличения длины лавы 5003 до 400 м и производительности — до 65–70 тыс. т/сут.

Лава 5003 проектируется для отработки мощного пологого угольного пласта 50 системой разработки — длинные столбы по простиранию. Пласт 50 мощностью 3.79 м залегает на глубинах от 100 до 260 м и имеет простое строение. Он опасен по взрывчатости угольной пыли, склонен к самовозгоранию с инкубационным периодом 57 сут и с глубины 220 м относится к угрожаемым по горным ударам [1]. Лава оснащена комплексом немецкой фирмы DBT, в который входят: механизированная крепь DBT 220/480 и 2400/5000, очистной комбайн SL-900, забойный скребковый конвейер SH PF 6/1142, штрековый скребковый конвейер SH PF 6/1342, дробилка SK 11/14. Основные горно-геологические и горнотехнические показатели лавы 5003 шахты им. В. Д. Ялевского приведены ниже.

Марка угля	ДГ
Плотность горной массы, т/м ³	1.34
Угол падения пласта 50, град	10
Средняя зольность угля, %	5.7
Выход летучих веществ, %	40.2
Сопrotивляемость пласта резанию, кН/м	225
Длина выемочного столба 5203, м	2300
Промышленные запасы угля в панели по пласту 50 пог. м, тыс. т	25670
Длина панели по простиранию, м	1440 – 3100
Длина панели по падению, м	2700
Промышленные запасы угля выемочного столба по чистым угольным пачкам, тыс. т	4488
Промышленные запасы угля выемочного столба по горной массе, тыс. т	4850
Природная метаноносность, м ³ /т	17.55
Площадь сечения лавы в свету, м ²	14.0
Вынимаемая мощность пласта 50, м	3.79
в том числе мощность верхнего / нижнего уступа	2.8 / 1.0
Длительность рабочей смены, ч	8
Количество рабочих смен в сутки	2
Техническая характеристика очистного комбайна SL-900	
Максимальная вынимаемая мощность пласта, м	6.0
Диаметр шнека, м	2.8
Ширина захвата, м	0.8
Количество резцов на шнеке	52
Количество резцов в одной линии резания	3
Количество резцов, одновременно участвующих в резании при отработке верхнего уступа	26
Количество резцов, одновременно участвующих в резании при отработке нижнего уступа	10
Мощность электродвигателей, кВт	2104
Максимальная скорость подачи, м/мин	48
Частота вращения шнека, об./мин	29 – 41
Общий вес, т	90
Техническая характеристика механизированной крепи DBT 220/480	
Ширина секции, мм	1750
Пределы раздвижки крепи, мм	2200 – 4800
Сопrotивление крепи, кН/м ²	985
Шаг передвижки, мм	800
Техническая характеристика забойного скребкового конвейера SH PF 6/1142	
Длина конвейера номинальная, м	До 300
Мощность электропривода, кВт	2250
Производительность, т/ч	3700
Скорость скребковой цепи, м/с	1.235

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ ДЛИНЫ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЛАВЫ

Для расчета технической производительности очистного комбайна предварительно определяется скорость его подачи при выемке угля [2 – 5]:

$$v = \frac{N\eta}{F_{ci}} = \frac{30N\eta n_1}{fP \cos \alpha \pm P \sin \alpha + SDn_2K}, \quad (1)$$

где N — мощность электродвигателя рабочего органа, кВт; $\eta = 0.95$ — КПД редуктора исполнительного органа для очистных комбайнов; F_{ci} — суммарная составляющая реакции забоя при резании пласта, кН; n_1 — количество резцов в одной линии резания; D — диаметр шнеков комбайна, м; $f = 0.18 - 0.25$ — коэффициент трения между комбайном и конвейером; P — вес комбайна, кН; α — угол падения пласта, град; n_2 — количество резцов, разрушающих забой одновременно (для большинства очистных комбайнов в работе участвует половина всех резцов на шнеке); $K = K_{o1}K_\alpha K_b K_p K_f$ — коэффициент, учитывающий отжим угля и другие параметры, K_{o1} — коэффициент отжима, учитывающий уменьшение сил резания вследствие горного давления [6]:

$$K_o = K_{o1} + \frac{\frac{r}{m} - 1}{\frac{r}{m} + 1}, \quad (2)$$

K_{o1} — коэффициент отжима на поверхности забоя (для Кузнецких углей марок К, Ж, ОС, Т, А $K_{o1} = 0.35$; для марок Г, Д $K_{o1} = 0.45$); r — ширина захвата исполнительного органа комбайна, м; m — вынимаемая мощность пласта (по угольным пачкам), м; K_α, K_b, K_p, K_f — коэффициенты, соответственно учитывающие угол резания, ширину резца, затупление и форму резцов; S — сопротивляемость пласта резанию, кН/м.

В (1) знак “плюс” перед составляющей веса комбайна означает движение вверх по лаве, а знак “минус” — вниз по лаве [3–5].

Теоретическая производительность (т/мин) очистного комбайна определяется с учетом (1) следующим образом:

$$A = \gamma mrv = \frac{30\gamma m r N \eta n_1}{fP \cos \alpha \pm P \sin \alpha + SDn_2 K}, \quad (3)$$

где γ — объемный вес угля, т/м³; m — вынимаемая мощность пласта, м.

По проекту [1] мощный пласт 50 принят к обработке очистным комбайном по односторонней схеме, при которой пласт делится на два уступа. Верхний уступ мощностью m_1 , равной диаметру шнека (2.8 м), обрабатывается комбайном при движении вверх по лаве, нижний мощностью m_2 (1.0 м) — при движении вниз по лаве с одновременной зачисткой почвы пласта. Косой заезд комбайна осуществляется один раз за цикл в нижней части лавы.

Скорость подачи при движении комбайна вверх по лаве и обработке верхнего уступа мощностью 2.8 м рассчитывается по формуле

$$v_1 = \frac{30N\eta n_1}{fP \cos \alpha + P \sin \alpha + SDn_{21}K} = 19.5, \quad (4)$$

где $n_{21} = 0.5n_p = 26$ — количество резцов, одновременно участвующих в резании, n_p — общее количество резцов на шнеке.

Скорость подачи при движении комбайна вниз по лаве и обработке нижнего уступа мощностью 1.0 м определяется как

$$v_2 = \frac{30N\eta n_1}{fP \cos \alpha - P \sin \alpha + Sm_2 n_{22} K} = 24, \quad (5)$$

где $n_{22} = 21$ — количество резцов, одновременно участвующих в работе при обработке нижнего уступа.

Время обработки верхнего уступа с учетом (1):

$$T_1 = \frac{L}{v_1} = \frac{(fP \cos \alpha + P \sin \alpha + SDn_{21}K)L}{30N\eta n_1}, \quad (6)$$

Время отработки нижнего уступа с зачисткой почвы пласта и косым заездом [3, 7]:

$$T_2 = \frac{L}{v_2} + T_{\text{ко}} = \frac{(fP \cos \alpha - P \sin \alpha + Sm_2 n_{22} K)L}{30N\eta n_1} + k_y \left(\frac{3L_k}{v_k} + \frac{r}{v_{\text{фк}}} \right), \quad (7)$$

здесь $k_y = 1.0 - 1.3$ — коэффициент организации труда на концевых операциях; L_k — длина косого заезда, м; v_k — скорость подачи комбайна при косом заезде, м/мин; $v_{\text{фк}}$ — скорость фланговой передвижки концевой участка скребкового конвейера, м/мин.

Время одного цикла при односторонней схеме работы очистного забоя:

$$T = T_1 + T_2 = \frac{L}{v_1} + \frac{L}{v_2} + T_{\text{ко}} = \frac{L}{30N\eta n_1} [2fP \cos \alpha + Sm(n_{21} + n_{22})K] + k_y \left(\frac{3L_k}{v_k} + \frac{r}{v_{\text{фк}}} \right). \quad (8)$$

Количество циклов в сутки при односторонней схеме работы комбайна:

$$n(L) = \frac{60n_c T_c}{T} = \frac{60n_c T_c}{T_1 + T_2} = \frac{60n_c T_c}{\frac{L}{30N\eta n_1} [2fP \cos \alpha + Sm(n_{21} + n_{22})K] + k_y \left(\frac{3L_k}{v_k} + \frac{r}{v_{\text{фк}}} \right)}, \quad (9)$$

где n_c — количество рабочих смен в сутки; T_c — длительность рабочей смены, ч; T — длительность одного цикла, мин.

При одинаковой плотности угля в уступах суточная техническая производительность (т/сут) очистного забоя при односторонней схеме работы комбайна определяется по формуле

$$A(L) = n(L) \gamma m r L = \frac{60 \gamma m r L n_c T_c}{T_1 + T_2} = \frac{60 \gamma m r n_c T_c}{\frac{2fP \cos \alpha + Sm(n_{21} + n_{22})K}{30N\eta n_1} + \frac{k_y}{L} \left(\frac{3L_k}{v_k} + \frac{r}{v_{\text{фк}}} \right)}. \quad (10)$$

Анализ (10) показывает, что техническая производительность очистного комбайна имеет нелинейную возрастающую зависимость от длины L лавы (рис. 1).

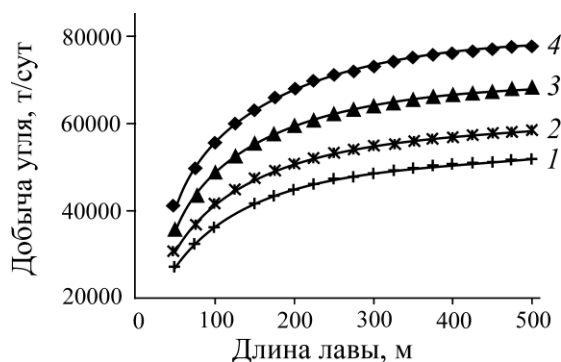


Рис. 1. Зависимость суточной добычи угля от длины лавы 5003 при скоростях подачи очистного комбайна SL-900 19.5 и 24 м/мин для различных вариантов организации очистных работ: 1 — 2 смены по 8 ч; 2 — 2,25 смены по 8 ч; 3 — 3 смены по 7 ч; 4 — 3 смены по 8 ч

Расчет технической производительности очистного комбайна SL-900 при отработке выемочного столба 5003 шахты выполнен по (10) с учетом исходных данных. Рассмотрен вариант расчета: при скоростях подачи комбайна 19.5 м/мин при отработке верхнего и 24 м/мин — при отработке нижнего уступов. В расчетах использованы следующие варианты организации работы очистного забоя: 2 смены по 8 ч (по проекту), 2,25 смены по 8 ч, 3 смены по 7 ч, 3 смены по 8 ч. В сводном виде результаты расчетов приведены в таблице.

Технологические параметры лавы 5003 при работе очистного комбайна SL-900

Длина лавы, м	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500
	2 смены по 8 ч												
Время отработки, мин: верхнего/ нижнего уступа	8.35/ 9.01	9.40/ 9.67	10.44/ 10.33	11.49/ 10.99	12.53/ 11.64	13.58/ 12.30	14.62/ 12.96	15.67/ 13.62	16.71/ 14.28	17.75/ 14.93	18.80/ 15.59	19.84/ 16.25	20.89/ 16.91
Время цикла, мин	17.37	19.07	20.77	22.47	24.18	25.88	27.58	29.28	30.99	32.69	34.39	36.09	37.80
Количество циклов	55	50	46	43	40	37	35	33	31	29	28	27	25
Добыча с цикла, т	815	917	1018	1120	1222	1324	1426	1528	1629	1731	1833	1934.96	2036.8
Добыча при количестве часов (2·8), т/сут	45 033	46 140	47 065	47 850	48 525	49 111	49 625	50 078	50 483	50 844	51 171	51 466	51 734.7
	3 смены по 7 ч												
Время отработки, мин: верхнего/ нижнего уступа	8.35/ 9.01	9.40/ 9.67	10.44/ 10.33	11.49/ 10.99	12.53/ 11.64	13.58/ 12.30	14.62/ 12.96	15.67/ 13.62	16.71/ 14.28	17.75/ 14.93	18.80/ 15.59	19.84/ 16.25	20.89/ 16.91
Время цикла, мин	17.37	19.07	20.77	22.47	24.18	25.88	27.58	29.28	30.99	32.69	34.39	36.09	37.80
Количество циклов	73	66	61	56	52	49	46	43	41	39	37	35	33
Добыча с цикла, т	815	917	1018	1120	1222	1324	1426	1528	1629	1731	1833	1935	2037
Добыча при количестве часов (3·7), т/сут	59 105	60 558	61 773	62 804	63 689	64 458	65 132	65 728	66 258	66 733	67 161	67 549	67 902
	3 смены по 8 ч												
Время отработки, мин: верхнего/ нижнего уступа	8.35/ 9.01	9.40/ 9.67	10.44/ 10.33	11.49/ 10.99	12.53/ 11.64	13.58/ 12.30	14.62/ 12.96	15.67/ 13.62	16.71/ 14.28	17.75/ 14.93	18.80/ 15.59	19.84/ 16.25	20.89/ 16.91
Время цикла, мин	17.37	19.07	20.77	22.47	24.18	25.88	27.58	29.28	30.99	32.69	34.39	36.09	37.80
Количество циклов	83	76	69	64	60	56	52	49	46	44	42	40	38
Добыча с цикла, т	815	917	1018	1120	1222	1324	1426	1528	1629	1731	1833	1935	2037
Добыча при количестве часов (3·8), т/сут	67 549	69 209	70 598	71 775	72 788	73 666	74 437	75 118	75 724	76 267	76 756	77 199	77 602

Анализ полученных результатов показывает, что при отработке комбайном нижнего уступа мощностью 1.0 м со скоростью подачи 38 м/мин техническая производительность очистного комбайна составляет: 50 483 т/сут при 2 рабочих сменах по 8 ч, 56 793 т/сут при 2.25 рабочих сменах по 8 ч, 66 258 т/сут при 3 рабочих сменах по 7 ч, 75 724 т/сут при 3 рабочих сменах по 8 ч. Таким образом, по техническим возможностям очистного комбайна SL-900 максимальная суточная добыча угля из лавы 5003 может составить 75 724 т/сут при организации очистных работ в 3 рабочие смены по 8 ч (без ремонтной смены).

РАСЧЕТ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЛАВНОГО СКРЕБКОВОГО КОНВЕЙЕРА

Расчетная производительность скребкового конвейера [2, 8] определяется по формуле

$$Q = 60Fk(\alpha)gv, \quad (11)$$

где F — площадь поперечного сечения горной массы на конвейере, m^2 ; v — скорость движения цепи и скребков конвейера, m/s ; g — насыпная плотность горной массы на конвейере, t/m^3 ; $k(\alpha)$ — коэффициент использования желоба рештаков, учитывающий уменьшение объема горной массы на рештаке при увеличении угла наклона α конвейера.

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

$$k(\alpha) = -0.0002\alpha^2 - 0.0006\alpha + 0.7479. \quad (12)$$

Площадь поперечного сечения насыпной горной массы на конвейере находится следующим образом:

$$F = bh\psi + 0.25b^2 \operatorname{tg} \varphi, \quad (13)$$

b — ширина рештака, m ; h — высота рештака, m ; $\psi = 0.7 - 0.8$ — коэффициент заполнения рештаков конвейера для плохосыпучей горной массы; φ — угол естественного откоса насыпной горной массы на конвейере.

Фактическая скорость движения цепи и скребков конвейера рассчитывается в зависимости от мощности конвейера и его длины:

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

здесь N_k — мощность привода конвейера, kBt ; $\eta = 0.8 - 0.95$ — КПД привода скребкового конвейера; L — длина конвейера, m , $q_g = 1000F\gamma\psi$ — расчетная погонная масса груза на конвейере, kg/m ; q_0 — погонная масса цепи со скребками (kg/m), принимается по справочным данным или ориентировочно по формуле $q_0 \approx kq_g$ ($k = 0.6 - 0.8$ — для двухцепных конвейеров); $f_1 = 0.2 - 0.35$ — коэффициент трения между цепью и рештаком; $f_2 = 0.35 - 0.6$ — коэффициент трения между насыпной горной массой и рештаком.

Расчет пропускной способности скребкового конвейера SH PF 6/1142 выполнен в зависимости от длины лавы и приведен на рис. 2.

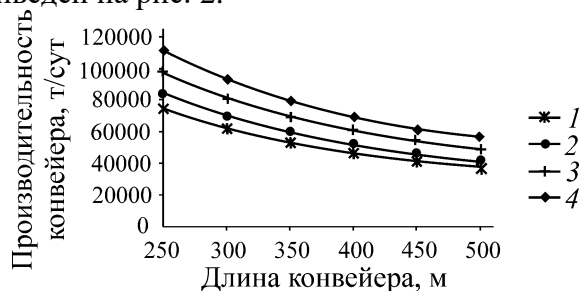


Рис. 2. Зависимость производительности скребкового конвейера SH PF 6/1142 от его длины для различных вариантов организации очистных работ: 1 — 2 смены по 8 ч; 2 — 2.25 смены по 8 ч; 3 — 3 смены по 7 ч; 4 — 3 смены по 8 ч

Таким образом, по пропускной способности скребкового конвейера SH PF 6/1142 допускается рост производительности очистного забоя 5003 до 70 000 т/сут при режиме очистных работ 3 рабочие смены по 8 ч.

ОПТИМИЗАЦИЯ ДЛИНЫ ЛАВЫ ПО УСЛОВИЮ МАКСИМУМА ГОДОВОЙ ПРИБЫЛИ

Годовая прибыль, получаемая шахтой от продажи угля из очистного забоя, в общем виде выражается зависимостью, представляющей собой разность между возрастающими нелинейной и линейной функциями годового дохода и амортизационных отчислений от длины очистного забоя:

$$P(L) = \frac{zn_p a}{b + \frac{d}{L}} - C_0 - H_o K_o - (H_k k_k + H_c k_c)L \rightarrow \max, \quad (15)$$

где z — оптовая цена 1 т угля, зависящая от марки угля и его качества, руб./т; n_p — количество рабочих дней в году; a, b, d — технологические параметры очистных работ; C_0 — 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 [4, 5].

Поиск максимума функции (15) сводится к ее дифференцированию и решению уравнения ($dP/dL = 0$), которое имеет вид:

$$L_o = \frac{1}{b_i} \left(\sqrt{\frac{sd_i a}{c_1}} - d_i \right) = \frac{1}{b_i} \left(\sqrt{\frac{60zd_i \gamma m r n_{cm} T_{cm} n_p}{H_k k_k + H_c k_c}} - d_i \right), \quad i = 1, 2, \quad (16)$$

где L_o — оптимальная длина; n_{cm} — количество рабочих смен в сутки по добыче угля; T_{cm} — длительность рабочей смены, а коэффициенты b_i, d_i определяются по формулам:

для односторонней схемы работы комбайна с зачисткой почвы обратным ходом:

$$b_1 = \frac{fP \cos a \pm P \sin a + S_{cp} n_2 K}{30N\eta n_1} + \frac{1}{v_M}; \quad d_1 = \frac{k_y L_k}{v_k}, \quad (17)$$

для челноковой схемы работы комбайна:

$$b_2 = \frac{fP \cos \alpha + S_{cp} D n_2 K}{30N\eta n_1}; \quad d_2 = k_y \left(\frac{3L_k}{v_k} + 5l_M + \frac{r}{v_{фк}} \right), \quad (18)$$

v_M — маневренная скорость комбайна.

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

$$L_o = \frac{30N\eta n_1}{fP \cos \alpha + S D n_2 K} \left(\sqrt{\frac{60zd_2 \gamma m r n_c T_c n_p}{H_k k_k + H_c k_c}} - d_2 \right). \quad (19)$$

Из анализа решения (19) следует, что оптимальная длина очистного забоя:

- нелинейно возрастает с увеличением оптовой цены z 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 очистного комбайна и нелинейно убывает с возрастанием сопротивляемости угля резанию S_{cp} , угла α падения пласта, диаметра D шнека.

Расчет оптимальной длины лавы 5003 шахты им. В. Д. Ялевского проведен по условию максимума годовой прибыли (15) при проектном режиме работы 2 рабочие смены по 8 ч, со средней скоростью подачи очистного комбайна 19.5 м/мин. Максимум годовой прибыли достигается при оптимальной длине лавы 450 м и производительности очистного забоя 37 117 т/сут. Равноценной также является оптимальная длина лавы 500 м.

ОПТИМИЗАЦИЯ ДЛИНЫ ЛАВЫ ПО УСЛОВИЮ МАКСИМУМА ЧИСТОГО ДИСКОНТИРОВАННОГО ДОХОДА

Учитывая зависимости (15)–(19), общий дисконтированный доход, получаемый шахтой от отработки промышленных запасов панели с учетом потерь угля в целиках и инвестиций на приобретение комплекса, имеет вид:

$$\begin{aligned}
 F(L_o) &= \sum_{t=1}^{T(L_o)} \frac{(s-c)A(L_o)}{(1+E)^t} - \sum_{t=1}^{T(L_o)} \frac{c_n(L_o)}{(1+E)^t} - K_o - (k_k + k_c)L_o = \\
 &= \frac{\delta(L_o)}{T(L_o)} (s-c)\gamma m L_p L_c \left(1 - \left[\frac{b}{L_o + b} \right] \right) - \frac{\delta(L_o)}{T(L_o)} \left[\frac{L_p}{L_o + b} \right] (2c_n L_c + 2c_o L_o + c_n L_o \cos \alpha) - \\
 &- K_o - (k_k + k_c)L_o \rightarrow \max
 \end{aligned} \quad (20)$$

при соблюдении ограничения по условию вентиляции $A(L_o) \leq A_b$, где A_b — допускаемая производительность забоя по фактору вентиляции; E — норма дисконта; c , c_n — себестоимость соответственно очистных и подготовительных работ, руб./т; $\delta(L_o)$ — коэффициент аннуитета, определяемый по формуле Моркилла [9]:

$$\delta(L_o) = \frac{1}{E} \left(1 - \frac{1}{(1+E)^{T(L_o)}} \right). \quad (21)$$

Как видно, эта функция представляет собой разность между возрастающей нелинейной асимптотической зависимостью прибыли и линейной функцией капиталовложений, которая создает точку максимума дисконтированного дохода относительно длины очистного забоя.

Анализ результатов расчета показывает, что максимум чистого дисконтированного дохода достигается при длине лавы 512 м. Практически равноценными являются также варианты длины лавы 500 и 525 м. При длине лавы 512 м оптимальны следующие параметры: извлекаемые промышленные запасы угля в панели — 23 768 тыс. т, количество выемочных столбов — 5, количество штреков — 10, потери угля в охранных межлавных целиках — 1902 тыс. т или 7.4 %, срок отработки панели — 4.6 лет со среднегодовым объемом добычи угля 5200 тыс. т/год.

При увеличении длины лавы с 400 до 512 м значительно (на 20.7 %) снижаются потери угля в охранных межлавных целиках и затраты на проходку штреков (на 16.7 %). Однако чистый дисконтированный доход при этом увеличивается всего на 0.5 %, что позволяет сделать вывод о равноценности проектного варианта с длиной лавы 400 м и оптимального варианта с длиной лавы 512 м.

РАСЧЕТ МЕТАНОВЫДЕЛЕНИЯ В ОЧИСТНОМ ЗАБОЕ И ДОПУСКАЕМОЙ ДЛИНЫ ЛАВЫ ПО ГАЗОВОМУ ФАКТОРУ

Значения метановыделения из отбитого угля в зависимости от скорости подачи очистного комбайна и производительности лавы 5003 рассчитаны по формуле [10]:

$$Q(X) = \frac{180vmrk_1(0.9X(1+bP_a) - abP_a)}{\mu b(a - 0.9X)} \sum_{i=1}^k \frac{\beta_i(v_{\Pi})}{R_i^2}, \quad (22)$$

где $X = X_c + X_{cb}$ — природная метаносность разрабатываемого пласта, $\text{м}^3/\text{т}$, X_c , X_{cb} — соответственно объем сорбированного и свободного метана в угле, $\text{м}^3/\text{т}$; a , b — постоянные изотермы Ленгмюра для угля, определяемые по [11]; k — количество классов фракций отбитого угля; k_1 — коэффициент проницаемости угля, м^2 ; P_a — соответственно поровое давление газа внутри куска угля и атмосферное давление в забое, Па; μ — абсолютная вязкость среды на пути фильтрации метана, Па·с; $\beta_i(v)$ — зависимость выхода класса i -й фракции от скорости движения очистного комбайна, %; R_i — средний радиус частицы угля i -й фракции, м (рис. 3).

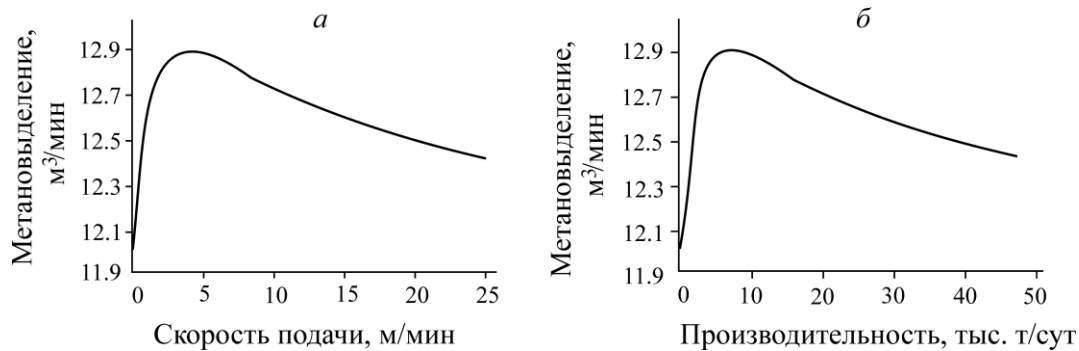


Рис. 3. Зависимость метановыделения из отбитого угля от скорости подачи комбайна (а) и производительности лавы 5003 (б)

Расчеты выполнены для проектного режима работы лавы — 2 рабочие смены по 8 ч. Для расчета порового давления и дебита метана использованы следующие данные: коэффициент проницаемости угля $k_1 = 0.01 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$, константы десорбции Ленгмюра $a = 49.3 \text{ м}^3/\text{т}$, $b = 0.207 \cdot 10^{-6} \text{ 1/Па}$, динамическая вязкость метана $\mu = 1.05 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$, частота вращения шнека $n = 29 \text{ об./мин}$, вылет резца $h_p = 0.08 \text{ м}$.

Анализ полученных значений показывает, что наибольшее метановыделение происходит при низкой скорости подачи очистного комбайна в пределах 5 м/мин. Затем с увеличением скорости подачи комбайна метановыделение нелинейно снижается и при проектных значениях скорости подачи 19.5–19.8 м/мин и производительности забоя 37 000 т/сут составляет $12.5 \text{ м}^3/\text{мин}$, что близко к фактическим значениям $12.88 \text{ м}^3/\text{мин}$ в мае 2017 г. Таким образом, при существующих длине лавы 400 м и схеме проветривания очистного забоя увеличение производительности до 75 тыс./сут приводит к снижению метановыделения с 12.5 до $12.3 \text{ м}^3/\text{мин}$ и не лимитирует нагрузку на очистной забой по газовому фактору.

По фактическим данным работы лавы 5003 в мае 2017 г. количество воздуха на входящей струе составило $3200 \text{ м}^3/\text{мин}$, на исходящей — $2300 \text{ м}^3/\text{мин}$, утечки воздуха через секции механизированной крепи — $900 \text{ м}^3/\text{мин}$, или $2.25 \text{ м}^3/\text{мин}$ на 1 м длины лавы, или $3.9 \text{ м}^3/\text{мин}$ на одну секцию крепи.

На рис. 4 показаны зависимости концентрации метана и количества воздуха от длины лавы. Видно, что количество воздуха в лаве снижается по линейной зависимости, а концентрация метана возрастает по нелинейной гиперболической зависимости. При фактической длине лавы 400 м концентрация метана на исходящей струе составляет 0.56 %. При длине лавы 600 м концентрация метана соответствует предельной (1 %). Отсюда следует, что предельная допустимая по газовому фактору длина лавы равна 600 м, а соответствующая допускаемая производительность очистного забоя — 80 000 т/сут.

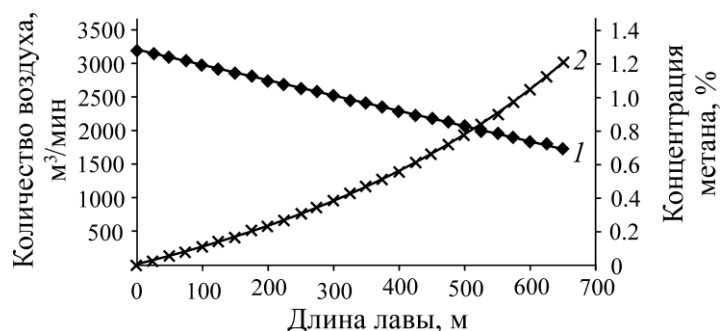


Рис. 4. Зависимости количества воздуха (1) и концентрации метана (2) от длины лавы 5003

Расчеты показывают, что при длине лавы 400 м и увеличении производительности до 70 000 т/сут ограничения по газовому фактору не ожидается вследствие снижения метановыделения из отбитого угля с 12.5 до 12.3 м³/мин, при этом возможно снижение концентрации метана на исходящей струе до 0.53 %.

ВЫВОДЫ

Технические возможности очистного комбайна SL-900 позволяют увеличить производительность лавы 5003 до 75 000 т/сут, что может быть достигнуто при режиме очистных работ 3 рабочие смены по 8 ч и увеличении скорости подачи очистного комбайна SL-900 до 38 м/мин при отработке обратным ходом нижнего уступа мощностью 1.0 м.

Расчет пропускной способности скребкового конвейера SH PF 6/1142 позволяет повысить производительность очистного забоя до 69 000 т/сут при указанном режиме работы. Определена экономическая целесообразность увеличения длины лавы до 500 м при отработке пласта 50; длина 400 м близка к оптимальной. При длине лавы 512 м значительно (на 20.7 %) снижаются потери угля в охранных межлавных целиках и затраты на проходку штреков (на 16.7 %). Однако чистый дисконтированный доход повышается всего на 0.5 %, что позволяет сделать вывод о равноценности проектного варианта с длиной лавы 400 м и оптимального варианта с длиной лавы 512 м.

Скорость подачи очистного комбайна SL-600, равная 38 м/мин, вызывает снижение метановыделения в очистной забой с 12.5 до 12.3 м³/мин вследствие выхода крупных фракций более 100 мм и соответствующего снижения дебита метана. При длине лавы 400 м и увеличении производительности до 69 000 т/сут ограничения по газовому фактору не ожидается из-за снижения метановыделения из отбитого угля; при этом прогнозируется снижение концентрации метана на исходящей струе с 0.56 до 0.53 %.

Полученные результаты исследований переданы в АО «СУЭК-Кузбасс» и позволили достичь в очистном забое 5003 длиной 400 м в мае 2017 г. рекордной производительности 1407 тыс. т/месяц (более 50 тыс. т/сут).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Технический проект** разработки Соколовского каменноугольного месторождения. Отработка запасов пластов 50 и 52 в границах шахтоуправления «Котинская» ОАО «СУЭК-Кузбасс» с объединением сети горных выработок шахт им. В. Д. Ялевского и «Котинская». I этап. Дополнение № 3. Т. 1. Кн. 1. — Кемерово: НПЦ Востнии, 2017.

2. **Плотников В. П.** Вывод формулы для расчета производительности очистных комбайнов со шнековым, барабанным или корончатым исполнительным органом // Уголь. — 2009. — № 9. — С. 5–7.
3. **Методическое обеспечение** программы “ПРОЗА-4.0” для комплексной оптимизации очистных и подготовительных работ в панели шахты при подземной отработке пологих и наклонных угольных пластов. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2015.
4. **Союд В. И., Гетопанов В. Н., Рачек В. Л.** Проектирование и конструирование машин и комплексов. — М.: Недра, 1982. — 354 с.
5. **Ордин А. А., Никольский А. М., Метельков А. А.** Моделирование и оптимизация технологических параметров очистных и подготовительных работ в панели угольной шахты // ФТПРПИ. — 2013. — № 6. — С. 117–126.
6. **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.
7. **Александров Б. А., Кожухов Л. Ф., Антонов Ю. А. и др.** Горные машины и оборудование подземных разработок. — Кемерово: КузГТУ, 2006. — 113 с.
8. **Рудничный транспорт** и механизация вспомогательных работ: каталог-справочник / Ю. А. Кондрашин, В. К. Колояров, С. И. Ястремский и др. — М.: Горная книга, 2010. — 534 с.
9. **Методические рекомендации** по оценке эффективности инвестиционных проектов / руководители В. В. Коссов, В. Н. Лившиц, А. Г. Шахназаров. — М.: Экономика, 2000. — 417 с.
10. **Ордин А. А., Тимошенко А. М.** Нелинейные зависимости метановыделения от природной метанонасности угольного пласта и кинематических параметров резцов очистного комбайна // ФТПРПИ. — 2017. — № 2. — С. 110–117.
11. **Семькин Ю. А.** Повышение безопасности добычи угля на основе интенсификации газовыделения из пластовых скважин и совершенствования метода прогноза газообильности очистного забоя: дис. ... канд. техн. наук. — М.: НИТУ МИСиС, 2016.

Поступила в редакцию 26/VI 2018