

УДК 622.23.05

**ОПТИМИЗАЦИЯ ШИРИНЫ ЗАХВАТА ОЧИСТНОГО КОМБАЙНА
ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ
ПОЛОГИХ МЕТАНОНОСНЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ**

А. А. Ордин¹⁻³, А. М. Тимошенко⁴, Д. В. Ботвенко⁴

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: ordin@misd.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

²Институт вычислительных технологий СО РАН,
просп. Академика Лаврентьева, 6, 630090, г. Новосибирск, Россия

³ООО “НПЦ ВостНИИ”, ул. Институтская, 1, 650002, г. Кемерово, Россия

⁴АО “НЦ ВостНИИ”, ул. Институтская, 3, 650002, г. Кемерово, Россия

Представлены технические характеристики отечественных и зарубежных очистных комбайнов. Изложена постановка задачи оптимизации ширины захвата шнекового комбайна по условию максимума его производительности с учетом горно-геологических и технологических факторов. С использованием аппроксимирующих линейных функций коэффициента отжима от ширины захвата получено аналитическое решение поставленной задачи. Проанализированы факторы, влияющие на оптимальную ширину захвата очистного комбайна и сформулированы соответствующие рекомендации. Показана экстремальная зависимость метановыделения из отбитого угля в очистном забое и выполнена проверка по газовому фактору допустимой производительности очистного забоя 5214-1 шахты им. В. Д. Ялевского Кузнецкого угольного бассейна.

Шахта, очистной комбайн, шнек, ширина захвата, оптимизация, производительность, скорость подачи, частота вращения, тангенциальные резцы

DOI: 10.15372/FTPRPI20190609

В настоящее время при подземном способе пологие пласты разрабатываются длинно-столбовой системой разработки с применением механизированных крепей и шнековых очистных комбайнов [1]. С 2014 по 2018 г. среднемесячная производительность труда выросла на шахтах на 31 %, на разрезах — на 14. Современная тенденция механизации очистных работ заключается в увеличении ширины захвата, производительности и мощности шнековых комбайнов. Первые узкозахватные очистные комбайны выпускались в СССР с шириной захвата 0.63 м, сейчас ширина захвата комбайнов SL-500, SL-1000 достигает 1.2 м, скорость подачи — 30 м/мин, суммарная мощность приводов резания и подачи превышает 2000 кВт (рис. 1, табл. 1) [2].

Увеличение ширины захвата комбайна имеет и негативные стороны. Резание пласта в кутковой части забоя осуществляется вне зоны отжима, т. е. в области с повышенным сопротивлением пласта резанию. Широкозахватная выемка увеличивает площадь незакрепленной части

кровли пласта, что влечет за собой вывалы породы в очистной забой. При выемке и погрузке угля шнеками комбайна на скребковый конвейер происходит переизмельчение угольной массы, что способствует повышению метановыделения в очистном забое и снижению оптовой цены угля из-за его низкой сортности. Увеличение дебита метана из мелкодисперсной угольной массы приводит к тому, что на многих шахтах Кузбасса производительность длинных очистных забоев сдерживается газовым фактором [3–5].



Рис. 1. Шнековый комбайн SL-500 в очистном забое

Вопросам повышения эффективности работы шнековых комбайнов посвящено много работ [3–13]. Существующие методики расчета производительности очистного комбайна недостаточно полно учитывают влияющие горно-геологические и технологические факторы, поэтому изложенные зависимости носят упрощенный характер. Например, скорость подачи v и производительность очистного комбайна A определяются по формулам:

$$v = \frac{30N\eta n_1}{SDn_2K_oK_\Sigma}, \quad A = \gamma mrv = \frac{30N\gamma mrv\eta n_1}{SDn_2K_oK_\Sigma}, \quad (1)$$

где N — мощность электродвигателей комбайна, кВт; η — КПД редуктора привода подачи; n_1 — количество резцов в одной линии резания; n_2 — количество резцов, разрушающих забой одновременно; S — средневзвешенная сопротивляемость угля резанию, кН/м; D — диаметр шнека, м; K_o — коэффициент отжима, учитывающий уменьшение сил резания вблизи груди забоя; $K_\Sigma = K_\alpha K_b K_p K_f$ — коэффициент, учитывающий угол резания, ширину резца, затупление и форму резцов; γ — плотность угля, т/м³; m — вынимаемая мощность пласта, м; r — ширина захвата очистного комбайна, м [3–5].

ТАБЛИЦА 1. Технические характеристики очистных комбайнов

Комбайн	Мощность пласта, м	Суммарная мощность электродвигателей, кВт	Диаметр шнека, м	Максимальная скорость подачи, м/мин	Ширина захвата, м	Производительность, т/мин
Кузбасс 500Ю	1.60–4.0	605	1.4–2.0	9.5	0.63	16
УКД-400	0.85–1.5	460	0.8–1.1	12.0	0.70	6.5–12
K500	1.60–3.5	635	1.4–1.8	7.0	0.82	8–14
4LS-5	1.50–3.3	772	1.4–1.8	20.0	0.68–1.02	30–36
SL-500	2.20–6.0	855	2.0–3.0	37.0	0.67–1.20	30–150
SL-1000	2.50–6.8	2190	2.0–3.5	40.0	0.85–1.20	45–160

Сопrotивляемость резанию, как отношение силы резания к толщине стружки, — основная характеристика степени разрушаемости пород при механическом воздействии [14]. Угольные пласты по сопротивляемости резанию делятся на группы: I — до 120 Н/мм, II — 120–240, III — 240–360, IV — > 360 Н/мм. Около 94 % Кузнецких угольных пластов относятся к группе II, 5 % — к III [14]. Сопrotивляемость пласта резанию связана с крепостью пород f по шкале Протоdjяконова и пределом их прочности на сжатие σ соотношением $S = 150f = 15\sigma$ [5].

Из (1) видно, что скорость подачи очистного комбайна не зависит от мощности пласта, его угла падения, веса и ширины захвата комбайна, а также от сил трения между комбайном и скребковым конвейером, а производительность комбайна определяется линейной зависимостью от мощности пласта и ширины захвата. Зависимости (1) недостаточно полно учитывают влияющие факторы. В [15] показано, что при выемке пласта на полную мощность двумя шнеками с учетом силы трения, веса комбайна и угла падения скорость подачи комбайна обратно пропорциональна мощности пласта. Производительность комбайна возрастает при увеличении мощности пласта не по линейной, как в (1), а по гиперболической зависимости:

$$v(m) = \frac{30N\eta n_1}{fP \cos \alpha \pm P \sin \alpha + Smn_2K_oK_\Sigma},$$

$$A(m) = \gamma mrv(m) = \frac{30N\gamma r\eta n_1}{\frac{1}{m}(fP \cos \alpha \pm P \sin \alpha) + Sn_2K_oK_\Sigma}. \quad (2)$$

Здесь P — вес комбайна, кН; f — коэффициент трения скольжения между комбайном и скребковым конвейером; α — угол падения пласта, град. Скорость подачи и производительность комбайна обратно пропорциональны весу комбайна и коэффициенту трения скольжения между комбайном и конвейером, а также зависит от угла падения пласта.

В (1), (2) производительность комбайна линейно зависит от ширины r его захвата. Докажем, что производительность очистного комбайна, в отличие от (1), (2), с увеличением ширины захвата возрастает нелинейно и имеет точку максимума.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Зависимости (2) учитывают большее количество факторов по сравнению с (1). Для более корректной постановки задачи расчета и оптимизации скорости подачи и производительности очистного комбайна в (2) необходимо учесть, что коэффициент отжима и количество одновременной работающих резцов являются функциональными зависимостями от ширины захвата комбайна.

Общее количество тангенциальных резцов на шнеке обусловлено количеством лопастей шнека k_L , расстоянием между резцами на лопасти h и длиной лопасти l , которая зависит от ширины захвата комбайна r и угла подъема винта шнека β :

$$n_p(r) = \frac{k_L l}{h} = \frac{k_L r}{h \sin \beta}. \quad (3)$$

Количество одновременно участвующих в резании пласта тангенциальных резцов при односторонней и челноковой технологических схемах и выемке пласта на полную мощность составляет примерно половину всех тангенциальных резцов на шнеке и учитывается коэффициентом k ($k = 0.4 - 0.6$ [4, 5]):

$$n_2(r) = kn_p(r) = \frac{k_L kr}{h \sin \beta}. \quad (4)$$

Коэффициент отжима является функцией от ширины захвата комбайна [16]:

$$K_o(r) = K'_o + \frac{r - k_1 m}{r + k_2 m}, \tag{5}$$

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

Коэффициент отжима зависит от степени хрупкости угля. По этой категории все угли делятся на вязкие, хрупкие и весьма хрупкие [14, 16]. Считают, что хрупкость углей связана со степенью их метаморфизма и, соответственно, увеличением прочности углей. К вязким углям относят сапропелевые, бурые угли, к хрупким — коксующиеся, а к весьма хрупким — антрациты.

Степень хрупкости угля E связана с показателем его способности к измельчению m_u зависимостью

$$E = \frac{e^{2.3m_u}}{m_u^2} - 8.4. \tag{6}$$

Для большинства угольных пластов способность к измельчению составляет 0.65–0.85 и не зависит от способов их разрушения. Средние значения хрупкости для вязких углей — 1.65, хрупких — 2.80, весьма хрупких — 4.20.

Из рис. 2 видно, что зависимости (5) коэффициента отжима от ширины захвата комбайна и свойств угля являются возрастающими, близкими к линейным. Аппроксимация коэффициента отжима от ширины захвата комбайна показывает высокую степень достоверности линейных зависимостей (табл. 2).

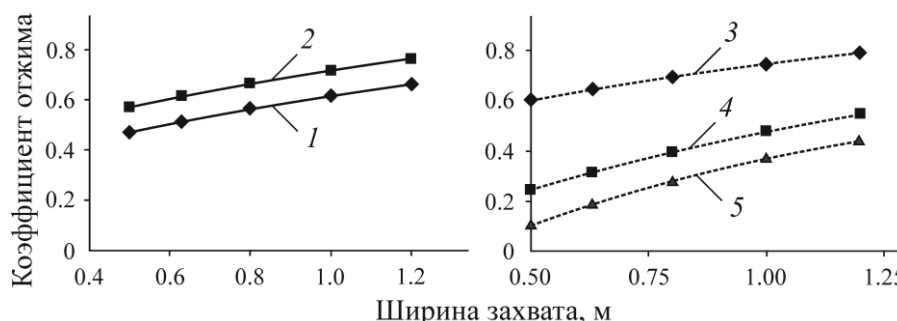


Рис. 2. Зависимость коэффициента отжима от ширины захвата комбайна: 1 — марки угля К, Ж, ОС, Т, А; 2 — марки угля Г, Д; 3 — вязкие угли; 4 — хрупкие; 5 — весьма хрупкие

После подстановки (4), (5) в (2) и соответствующих преобразований получаем нелинейные зависимости скорости подачи и производительности очистного комбайна от мощности пласта и ширины захвата:

$$v(m, r) = \frac{30N\eta n_1}{fP \cos \alpha \pm P \sin \alpha + \frac{Smk_L kK_\Sigma}{h \sin \beta} \left(rK'_o + \frac{r^2 - rk_1 m}{r + k_2 m} \right)}, \tag{7}$$

$$A(m, r) = \frac{30N\gamma\eta n_1}{\frac{1}{mr} (fP \cos \alpha \pm P \sin \alpha) + \frac{Sk_L kK_\Sigma}{h \sin \beta} \left(K'_o + \frac{r - k_1 m}{r + k_2 m} \right)} \rightarrow \max.$$

ТАБЛИЦА 2. Линейная зависимость коэффициента отжима от ширины захвата комбайна

Марка угля	Функция коэффициента отжима	Коэффициент аппроксимации
Мощность пласта 2 м		
К, Ж, ОС, Т, А	$0.29r + 0.43$	0.994
Г, Д	$0.29r + 0.32$	0.994
Вязкие	$0.30r + 0.45$	0.996
Хрупкие	$0.49r - 0.0024$	0.993
Весьма хрупкие	$0.54r - 0.17$	0.992
Мощность пласта 3 м		
К, Ж, ОС, Т, А	$0.23r + 0.39$	0.997
Г, Д	$0.23r + 0.29$	0.997
Вязкие	$0.24r + 0.42$	0.998
Хрупкие	$0.41r - 0.924$	0.996
Весьма хрупкие	$0.47r - 0.25$	0.995
Мощность пласта 4 м		
К, Ж, ОС, Т, А	$0.19r + 0.38$	0.998
Г, Д	$0.19r + 0.28$	0.998
Вязкие	$0.20r + 0.40$	0.999
Хрупкие	$0.35r - 0.10$	0.993
Весьма хрупкие	$0.40r - 0.29$	0.997
Мощность пласта 5 м		
К, Ж, ОС, Т, А	$0.16r + 0.37$	0.999
Г, Д	$0.16r + 0.27$	0.998
Вязкие	$0.17r + 0.40$	0.999
Хрупкие	$0.30r - 0.12$	0.998
Весьма хрупкие	$0.35r - 0.31$	0.998

Анализ (7) позволяет сделать вывод, что с увеличением ширины r захвата комбайна его скорость подачи нелинейно, в квадратической зависимости уменьшается. Знаменатель во второй формуле (7) — сумма убывающей гиперболической и возрастающей линейной зависимостей относительно ширины захвата и имеет точку минимума, следовательно, производительность очистного комбайна в этой точке достигает максимума.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Для получения аналитического решения учтем аппроксимацию коэффициента отжима линейными функциями от ширины захвата (см. табл. 2). Тогда зависимость (7) производительности комбайна запишем в виде

$$A(r) = \frac{b}{\frac{c}{r} + dr \pm e}, \quad (8)$$

где

$$b = 30N\gamma\eta n_1; \quad c = \frac{fP \cos \alpha \pm P \sin \alpha}{m}; \quad d = \frac{Sk_L kK_\Sigma g_1(m, p_1)}{h \sin \beta}; \quad e = \frac{Sk_L kK_\Sigma g_2(m, p_2)}{h \sin \beta};$$

$g_1(m, p_1)$, $g_2(m, p_2)$ — параметры аппроксимирующих функций коэффициента отжима в зависимости от мощности пласта, марок и степени хрупкости угля.

Для определения максимума функции (8) находим ее частную производную, приравняв ее к нулю:

$$\frac{\partial A}{\partial r} = \frac{-b\left(-\frac{c}{r^2} + d\right)}{\left(\frac{c}{r} + dr \pm e\right)^2} = 0. \tag{9}$$

Из решения (9) определяется оптимальная ширина захвата комбайна, при которой его производительность достигает максимума:

$$r_o = \sqrt{\frac{c}{d}} = \sqrt{\frac{(fP \cos \alpha \pm P \sin \alpha)h \sin \beta}{mSk_L kK_{\Sigma} g_1(m, p_1)}}. \tag{10}$$

АНАЛИЗ ВЛИЯЮЩИХ ФАКТОРОВ

Согласно (10), оптимальная ширина захвата комбайна нелинейно, в квадратической зависимости уменьшается с увеличением мощности и сопротивляемости пласта резанию, степени хрупкости и прочности угля. Для вязких, сапропелевых и бурых углей ширина захвата комбайна должна быть меньше, чем для хрупких, коксующихся и весьма хрупких углей. Так как сопротивляемость пласта резанию зависит от наличия породных прослоек, то с увеличением их количества и мощности ширину захвата комбайна следует уменьшать.

На рис. 3 показана зависимость производительности (7) очистного комбайна SL-500 от ширины захвата и сопротивляемости угля резанию. Максимум функции (7) 11.5 т/мин при сопротивляемости угля резанию 120 Н/мм соответствует оптимальной ширине захвата 1.20 м, а при увеличении сопротивляемости резанию со 150 до 240 Н/мм оптимальная ширина захвата снижается с 1.00 до 0.67 м.

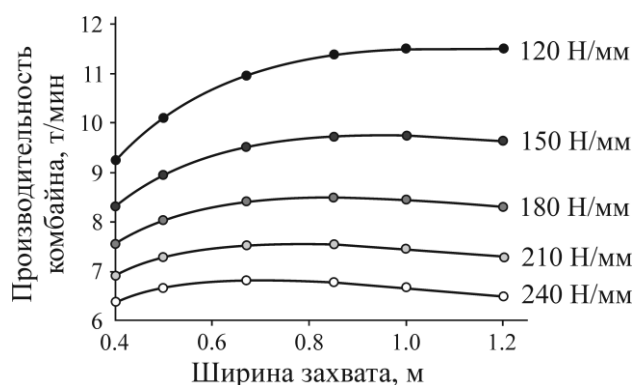


Рис. 3. Зависимость производительности очистного комбайна SL-500 от ширины захвата и сопротивляемости угля резанию

Из (10) следует, что оптимальная ширина захвата не зависит от мощности комбайна и нелинейно возрастает с увеличением его веса.

МЕТАНОВЫДЕЛЕНИЕ ИЗ ОТБИТОГО УГЛЯ В ОЧИСТНОМ ЗАБОЕ

После установления максимальной производительности и оптимальной ширины захвата шнекового комбайна необходимо рассчитать метановыделение из отбитого угля и концентрацию метана на исходящей струе лавы. При увеличении производительности очистного комбайна метановыделение из отбитого угля достигает максимума и затем снижается. Аналитическая зависимость этого явления описана в [17], для поставленной задачи она имеет вид

$$Q(A_{\max}) = mLv_1 + \frac{720mr_0k_1(0.9X(1+bP_a) - abP_a)}{\mu b(a - 0.9X) \left(\frac{A_{\max}}{\gamma m r_0 (\pi n n_{1л})^2} + \frac{h_p}{\pi n n_{1л}} + \frac{0.25 \gamma m r_0 h_p^2}{A_{\max}} \right)}$$

Здесь L — длина лавы, м; v_1 — скорость фильтрации метана из 1 м^2 обнаженной поверхности пласта, $\text{м}^3/\text{мин}$; X — природная метаноносность разрабатываемого пласта, $\text{м}^3/\text{т}$; a, b — постоянные изотермы Ленгмюра; P_a — атмосферное давление в забое, Па; μ — абсолютная вязкость среды на пути фильтрации метана, Па·с; h_p — расстояние между резами на лопастях шнека; n — частота вращения шнека, $1/\text{мин}$; A_{\max}, r_0 — максимальная производительность и оптимальная ширина захвата комбайна, определяемые по (7), (10).

Проверка на допускаемую концентрацию метана на исходящей струе выполняется по формуле

$$c = \frac{100Q(A_{\max})}{Q_B} \leq [c_o],$$

где $[c_o] = 1\%$ — допускаемая по правилам безопасности угольных шахт концентрация метана на исходящей струе из лавы [18]; Q_B — расход воздуха на исходящей струе лавы, $\text{м}^3/\text{мин}$.

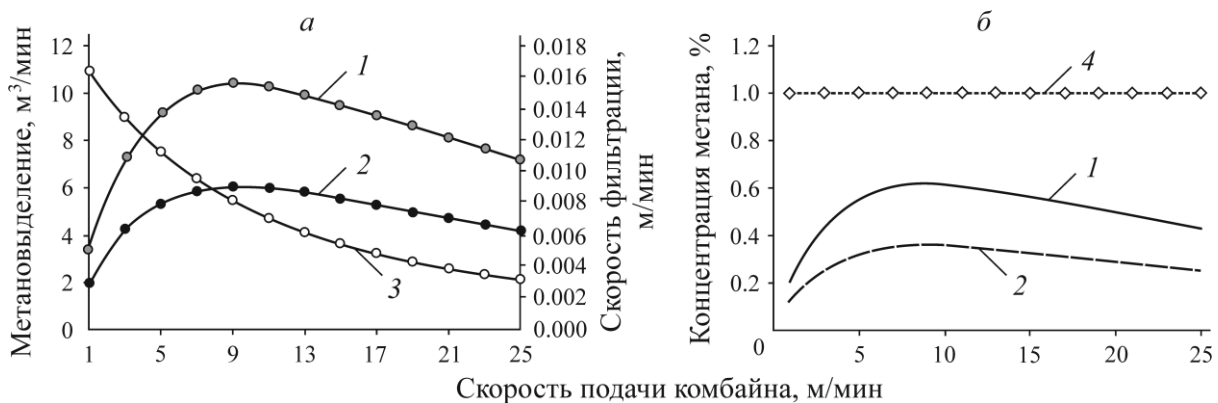


Рис. 4. Зависимость скорости фильтрации метана и метановыделения (а) и концентрации метана на исходящей струе из лавы (б) от скорости подачи комбайна: 1 — челноковая схема выемки; 2 — уступная; 3 — скорость фильтрации метана; 4 — допускаемая концентрация метана

На рис. 4 приведены расчетные показатели метановыделения из отбитого угля и концентрации метана на исходящей струе в зависимости от скорости подачи комбайна в лаве 5214-1 шахты им. В. Д. Ялевского. Максимум метановыделения $10 \text{ м}^3/\text{мин}$ из отбитого угля достигается при челноковой технологической схеме выемки и скорости подачи $9 \text{ м}/\text{мин}$ очистного комбайна SL-900 (рис. 4а), а при увеличении скорости подачи комбайна с 9 до $25 \text{ м}/\text{мин}$ метановыделение снижается с 10.0 до $7.5 \text{ м}^3/\text{мин}$. Концентрация метана на исходящей струе из лавы не превышает 1% (рис. 4б).

ВЫВОДЫ

Учет функциональных зависимостей коэффициента отжима и количества одновременно работающих резов позволил получить максимальную зависимость производительности очистного комбайна от ширины захвата. Анализ полученного аналитического решения при определении максимума производительности шнекового комбайна позволяет заключить, что оптимальная ширина захвата комбайна нелинейно, в квадратической зависимости уменьшается с увеличением мощности и сопротивляемости пласта резанию, степени хрупкости и прочности

угля. Для вязких углей ширина захвата комбайна должна быть меньше, чем для хрупких и весьма хрупких углей. Сопrotивляемость пласта резанию значительно зависит от наличия породных прослоек, поэтому с увеличением их количества и мощности ширину захвата комбайна следует уменьшать.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Технологические схемы** подготовки и отработки выемочных участков на шахтах ОАО “СУЭК-Кузбасс”. Т. 3. Подземные горные работы / В. Н. Демура, В. В. Артемьев, С. В. Ясюченя и др. — М.: Горное дело, 2014. — 256 с.
2. **Угольная промышленность** Кузбасса. Основные показатели работы. — Кемерово: ИВЦ, 2018. — 88 с.
3. **Солод В. И., Гетопанов В. Н., Рачек В. М.** Проектирование и конструирование горных машин и комплексов. — М.: Недра, 1982. — 350 с.
4. **Проектирование** и конструирование горных машин и комплексов / Г. В. Малеев, В. Г. Гуляев, Н. Г. Бойко и др. — М.: Недра, 1988. — 368 с.
5. **Плотников В. П.** Вывод формулы для расчета производительности очистных комбайнов со шнековым, барабанным или корончатым исполнительным органом // Уголь. — 2009. — № 9. — С. 5–7.
6. **Габов В. В., Нгуен Кхак Линь, Нгуен Ван Суан, Ле Тхань Бинь, Задков Д. А.** Обоснование геометрических и режимных параметров шнековых исполнительных органов, обеспечивающих эффективность погрузки угля на забойный конвейер // Уголь. — 2018. — № 2. — С. 32–35.
7. **Вернер В. Н.** Исследование и обоснование рациональных параметров шнековых погрузочно-транспортующих органов выемочных машин: дис. ... д-ра техн. наук. — Кемерово: КузГТУ, 1999. — 319 с.
8. **Wang F., Tu S., and Bai Q.** Practice and prospects of fully mechanized mining technology for thin coal seams in China, J. of the South African Institute of Min. and Metallurgy, 2012, Vol. 112, No. 2. — P. 161–170.
9. **Peng S. S.** Longwall mining, 2006, U. S. — 621 p.
10. **Ayhan M. and Eyuboglu E. M.** Comparison of globoid and cylindrical shearer drums' loading performance, J. of the South African Institute of Min. and Metallurgy, 2006, Vol. 106. — P. 51–56.
11. **Kuidong Gao, Changlong Du, Jianghui Dong, and Qingliang Zeng.** Influence of the drum position parameters and the ranging arm thickness on the coal loading performance, J. Minerals, 2015, Vol. 5. — P. 723–736.
12. **Skryabin R. M. and Timofeev N. G.** Development of an innovative shneko-heat-sink boring shell for drilling of shurfo-wells in the conditions of a kriolitizona, J. Eurasian Mining, 2016, No. 1. — P. 33–36.
13. **Zvonarev I. E. and Shishlyannikov D. I.** Efficiency improvement of loading of potassium ore by means of “Ural-20R” heading-and-winning machine, IOP Conf. Series, Earth and Environmental Sci., 2017, Vol. 87.
14. **Морозов В. И., Чуденков В. И., Сурина Н. В.** Очистные комбайны. — М.: МГУ, 2006. — 650 с.
15. **Ордин А. А., Никольский А. М.** Оптимизация ширины захвата и производительности шнекового комбайна при отработке пологого угольного пласта длинным очистным забоем // ФТПРПИ. — 2018. — № 1. — С. 79–86.
16. **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.
17. **Ордин А. А., Тимошенко А. М.** Нелинейные зависимости метановыделения от природной метаносности угольного пласта и кинематических параметров резцов очистного комбайна // ФТПРПИ. — 2017. — № 2. — С. 110–116.
18. **Федеральные нормы** и правила в области промышленной безопасности “Правила безопасности в угольных шахтах”. Сер. 05. — М.: ЗАО “НТЦИППБ”, 2017. — Вып. 40. — 198 с.

Поступила в редакцию 21/X 2019

После доработки 18/XI 2019

Принята к публикации 27/XI 2019