

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛИЯНИЯ НАДЕЖНОСТИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ И СВОЙСТВ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ОЧИСТНЫХ КОМБАЙНОВ

Ю.Н. Линник¹, В.Ю. Линник¹, А.Б. Жабин², А. Цих³

¹ Государственный университет управления, Москва, Россия,
e-mail: vy_linnik@guu.ru

² Тульский государственный университет, Тула, Россия

³ Ontex Hygieneartikel, Germany, Grospostwitz

Аннотация: При работе угледобывающих комбайнов их теоретическая и техническая производительность зависят от надежности применяемых исполнительных органов и износостойкости режущего инструмента для их оснащения. Исследованиями установлено, что интенсивность изнашивания резцов зависит от прочностных свойств пласта в зоне работы исполнительного органа, оцениваемых по сопротивляемости резанию, определяющей абразивные свойства разрушаемого массива. Обнаружены зависимости скорости подачи и теоретической производительности очистных комбайнов от площади затупления резцов, на основании которых рекомендованы предельно допустимые их значения для различных типов комбайнов, обладающих различной мощностью. Даны расчетные зависимости теоретической производительности для случаев постепенной и регламентированной замены резцов. Приведены результаты исследований потребляемой мощности, удельных энергозатрат и производительности комбайна по мере исчерпания ресурса исполнительного органа. Установлена физическая сущность закономерностей их изменения (роста), заключающаяся в увеличении динамической нагруженности комбайна при отказах резцедержателей и образовании межрезцовых целиков неразрушенного угольного массива, контактирование с которыми лопастей шнека ограничивает скорость подачи и увеличивает энергоемкость выемки угля. Техническая производительность комбайна, наряду с затратами времени на концевые операции и на устранение отказов забойного оборудования, зависит от времени на замену отказавших резцов и шнеков, не совмещенных с другими операциями по выемке угля. Рекомендованы расчетные зависимости для определения технической производительности комбайнов и потерь добычи, связанных с заменой резцов и шнеков.

Ключевые слова: угольный пласт, шнек, надежность, износ резцов, отказ резцедержателей, свойства угольных пластов, производительность комбайна, скорость подачи, потребляемая мощность, энергоемкость.

Для цитирования: Линник Ю. Н., Линник В. Ю., Жабин А. Б., Цих А. Закономерности влияния надежности исполнительных органов и свойств угольных пластов на производительность очистных комбайнов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 11. – С. 169–180. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_169.

Patterns of influence exerted by cutting drum reliability and coal seam properties on cutter-loader capacity

Yu.N. Linnik¹, V.Yu. Linnik¹, A.B. Zhabin², A. Zich³

¹ State University of Management, Moscow, Russia, e-mail: vy_linnik@guu.ru

² Tula State University, Tula, Russia

³ Ontex Hygieneartikel, Germany, Grospostwitz

Abstract: Practical and theoretical capacities of cutter-loaders depend on reliability of cutting drums and on wearability of cutting tools. The wear rate of cutter picks is governed by the strength of coal in the area of operation of the cutting drum. The coal strength characteristics are estimated from cuttability defining abrasive ability of coal and rocks under cutting. The correlations of the feed speed and theoretical capacity of cutter-loaders and the dulling area of cutter picks are obtained and used to recommend the maximum allowable values of these characteristics for different cutter-loaders of different capacities. The theoretical capacity equations are given for the events of piecemeal and specified replacement of cutter picks. The studies into input power, specific energy consumption and capacity of a cutter loader in proportion to depletion of cutting drum life are presented. The physics of their variation patterns (increase) consists in the growing dynamic burden of a cutter-loader when cutter supports fail and unbroken coal remains between cutter picks as the cutting drum blades interengage with such unbroken coal, which decelerates the machine feed speed and increases the energy content of coal cutting. The practical capacity of a cutter-loader, alongside with the time spent for accomplishment of ending operations and for emergency maintenance of longwall equipment depends on the replacement time of fault cutter picks and drums, out of other coal cutting operations. The computational relations for finding the practical capacity of cutter-loaders and the production loss connected with the replacement of cutter picks and drums are recommended.

Key words: coal seam, cutting drum, reliability, cutter pick wear, cutter support, coal seam properties, cutter-loader capacity, feed speed, input power, energy content.

For citation: Linnik Yu. N., Linnik V. Yu., Zhabin A. B., Zich A. Patterns of influence exerted by cutting drum reliability and coal seam properties on cutter-loader capacity. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(11):169-180. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_169.

Введение

На производительность очистных комбайнов, наряду с их техническими характеристиками, технологическими и горно-геологическими ограничениями, как показали исследования [1–3], влияет надежность применяемых исполнительных органов (шнеков), уровень которой определяется износостойкостью применяемых режущих инструментов (резцов) и прочностью резцедержателей. Поэтому при оценке влияния характе-

ристик надежности исполнительных органов на производительность очистных комбайнов следует учитывать затупление (изнашивание) резцов и отказы резцедержателей, которые, в свою очередь, зависят от характеристик разрушаемости угольных пластов [4–7]. Как будет показано ниже, затупление (изнашивание) резцов и отказы резцедержателей обуславливают снижение теоретической производительности (скорости подачи), а время на замену отказавших резцов

и исполнительных органов (шнеков), не совмещенное с технологическими перерывами для выполнения вспомогательных операций (концевых и маневровых, передвижка приводных станций, конвейера, крепи и т.д.) в очистном забое — на техническую производительность.

Влияние износа резцов на теоретическую производительность

Исследования, выполненные в различных условиях по разрушаемости угольных пластов, показали, что интенсивность изнашивания резцов зависит от прочностных свойств пласта в зоне работы исполнительного органа, оцениваемых по сопротивляемости его резанию,

определяющей абразивные свойства разрушаемого массива. Чем крепче пласт и чем меньше он подвергнут действию сил отжима, тем сильнее упакованы в нем твердые включения и тем выше его абразивные свойства, влияющие на интенсивность изнашивания резцов. И, наоборот, когда пласт ослаблен силами отжима, его абразивная способность, влияющая на процесс изнашивания резцов, существенно снижается.

Для определения интенсивности изнашивания наиболее часто применяемых в настоящее время поворотных резцов получена зависимость

$$i_k = 0,5 \cdot 10^{-6} \frac{(\rho_{пл})^{1,1}}{1 + 0,015(\rho_{пл})^{0,85}} \cdot (2,9A_{пл} + 88) \quad (1)$$

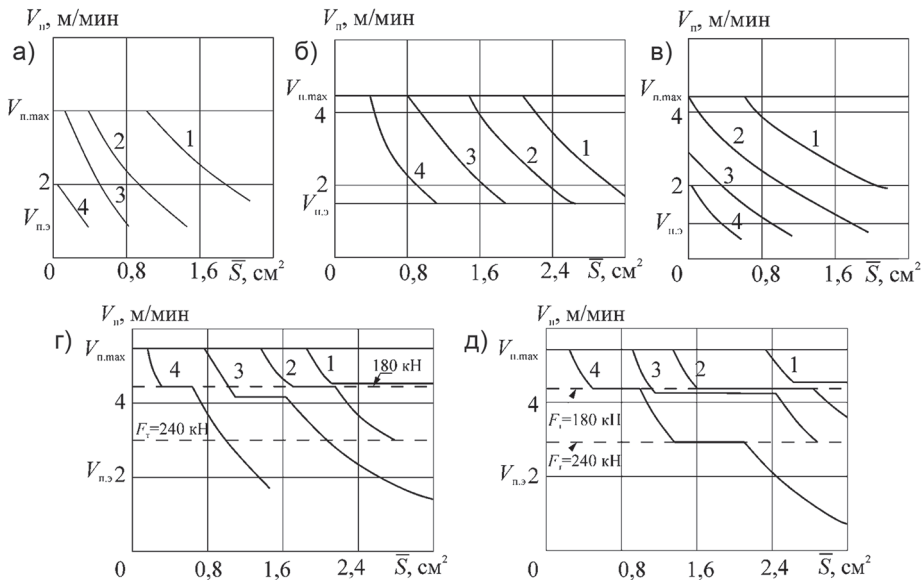


Рис. 1. Зависимости скорости подачи V_n от средней площади затупления резцов \bar{S} (см²) при работе комбайна на пластах с сопротивляемостью резанию $A_{пл}$, равной 100, 150, 200, 300 Н/мм (кривые 1–4 соответственно): $V_{n,max}$ — ограничение скорости подачи по техническим характеристикам подающей части комбайна, м/мин; $V_{n,э}$ — ограничение по минимальной рациональной скорости подачи (м/мин); F_t — ограничения по тяговым усилиям подающей части комбайнов 1К101 (а); 4ЛС-5 (б); КШ1КГУ (в); 1ГШ68 (г); К500Ю (д)

Fig. 1. Feed speed V_f versus average dulling area \bar{S} (cm²) of cutter picks in coal seams having cuttability A_s of 100, 150, 200 and 300 N/mm (curves 1–4, respectively): $V_{f,max}$ — feed speed limit with respect to cutter-loader feed specifications, m/min; $V_{f,э}$ — minimum efficient feed speed, m/min; F_t — traction force of cutter-loader models 1K101 (a), 4LS-5 (b), KSh1KGU (v), 1GSh68 (g), K500Yu (d)

где $\rho_{пл}$ – абразивность пласта, мг/км; $A_{пл}$ – сопротивляемость пласта резанию, Н/мм.

Скорость подачи комбайна в зависимости от средней площадки затупления комплекта резцов на исполнительном органе можно определить по графикам (рис. 1), полученным согласно расчетным зависимостям [8] с учетом ограничений подающей части и устойчивой мощности привода.

При выемке угольных пластов очистными комбайнами используются две технологические схемы замены резцов – постепенная и регламентированная. При использовании первой схемы заменяются отдельные резцы по мере достижения ими предельного износа $S_{пр}$, рационально допустимого для конкретных условий эксплуатации по сопротивляемости пласта резанию. Величина $S_{пр}$ в данном случае определяется по графикам (рис. 1), исходя из минимальной рациональной в данных условиях эксплуатации скорости подачи $V_{п.э}$, и не должна превышать значений, приведенных в табл. 1.

Под минимальной рациональной скоростью подачи комбайна понимается величина, ниже которой комбайн в данных условиях по сопротивляемости пласта резанию применять не целесообразно

по технико-экономическим соображениям.

При постепенной замене резцов на шнеках в течение всего времени работы очистного комбайна устанавливается среднестатистическая величина износа, равная

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n} \leq S_{пр}, \text{ см}^2, \quad (2)$$

где S_i – величина площадки затупления i -го резца, см²; $S_{пр}$ – предельная рационально допустимая площадка затупления резцов для конкретных условий эксплуатации по сопротивляемости пласта резанию см², n – число резцов на исполнительном органе.

При регламентированной замене резцов, когда по истечении запланированного времени непрерывной работы комбайна или после добычи заданного объема угля заменяется весь комплект резцов или его большая часть, теоретическая производительность \bar{q}_T равна средневзвешенной его величине за период работы без снижения и со снижением скорости подачи

$$\bar{q}_T = \frac{2n_1q_{T.0} + n_2(q_{T.0} + q_{T.S})}{2(n_1 + n_2)}, \text{ т/ч}, \quad (3)$$

где n_1 и n_2 – доля работы (от общего времени) очистного комбайна без и со сни-

Таблица 1

Предельно допустимые значения площадки затупления резцов*
Maximum allowable values for dulling areas of cutter picks

Комбайн	Рационально допустимая площадка затупления резцов 1Р0.80 (см ²) / / линейный износ резца по передней грани (мм) при сопротивляемости пласта резанию (Н/мм):					
	100	150	200	250	300	350
1К101У	2,5 / 5	1,5 / 3,0	0,7 / 1,6	0,5 / 1,0	–	–
4LS-5	3,0 / 6	3,0 / 6,0	2,5 / 5,0	1,8 / 3,6	1,2 / 2,0	–
КШ1КГУ	2,5 / 5	1,8 / 3,6	0,9 / 1,8	0,5 / 1,0	–	–
1ГШ68	3,0 / 6	3,0 / 6,0	2,5 / 5,0	2,5 / 5,0	1,5 / 3,0	0,7 / 1,6
К500Ю	3,0 / 6	3,0 / 6,0	3,0 / 6,0	3,0 / 6,0	2,5 / 5,0	2,0 / 4,0

* Пропуски в таблице означают, что по своим техническим характеристикам комбайны не рекомендовано использовать на пластах с соответствующим этим пропускам значениям сопротивляемости пласта резанию.

жением скорости подачи соответственно; $q_{т.0}$ и $q_{т.с}$ — теоретическая производительность комбайна без снижения и со снижением скорости подачи при работе с предельно затупленными резцами соответственно, т/ч.

Безразмерные величины n_1 и n_2 определяются из графиков (рис. 1) как отношения отрезков, соответствующих работе комбайна без и со снижением скорости подачи к общей продолжительности работы по выемке угля.

Снижение теоретической производительности $\Delta q_{т.с}$, связанное с заменой резцов для случаев их регламентированной и постепенной замены, рассчитывается по формуле

$$\Delta q_{т.с} = q_{т.0} - \bar{q}_т, \text{ т/ч}, \quad (4)$$

а снижение добычи угля ΔQ_s по этой причине

$$\Delta Q_s = \Delta q_{т.с} t_{м.о}, \text{ т}, \quad (5)$$

где $t_{м.о}$ — машинное время работы комбайна без учета снижения скорости подачи, ч.

Удельное снижение добычи угля по причине затупления резцов равно

$$\Delta Q_{y.s} = \frac{\Delta q_{т.с} t_{м.о}}{Q_{ц}}, \text{ т}, \quad (6)$$

где $Q_{ц}$ — добыча за цикл выемки угля, т.

Определение удельных энергозатрат и теоретической производительности комбайна по мере исчерпания ресурса исполнительного органа

Как известно [9, 10], при работе очистных комбайнов, особенно при выемке пластов сложного строения, содержащих крепкие породные прослойки и крупные твердые включения, исполнительные органы чаще всего меняют по причине отказов резцедержателей (разрывы по корпусу, износ гнезд), из-за чего приходится останавливать процесс добычи. Кроме того, по мере увеличения отказавших резцедержателей и уменьшения в этой связи остаточного ресурса шнеков возрастает

потребляемая комбайном мощность P_m , соответственно растут удельные энергозатраты на выемку угля и, как следствие, уменьшается скорость подачи V_n комбайна.

Влияние отказов резцедержателей на энергоемкость выемки угля оценивалось по результатам шахтных экспериментов, в ходе которых при работе комбайнов записывалась потребляемая мощность P_m с регистрацией ее мгновенных значений P_{mi} после чего, исходя из добытого объема угля, последующим пересчетом определялись значения энергоемкости выемки. Исследования проводились при выемке пластов, характеристики разрушаемости которых разнились в широком диапазоне значений показателей. Анализ полученных данных показал, что предельная скорость подачи $V_{пр}$ зависит не только от прочностных свойств пластов и степени их нарушенности, но и от числа отказавших резцедержателей на исполнительном органе $n_{от}$ (под $V_{пр}$ в данном случае понимается скорость подачи, которая является предельной в конкретных условиях эксплуатации по установленной мощности электродвигателей комбайна или его устойчивости на конвейере). При увеличении числа отказов нарушается схема расстановки резцов, что приводит к снижению $V_{пр}$. Наблюдениями было установлено, что при работе комбайнов на пластах с высоким удельным содержанием крепких неоднородностей (валуны, прослойки песчаников и алевролитов) увеличение потребляемой мощности по мере увеличения $n_{от}$ сохранялось даже при снижении $V_{пр}$ [11 – 15].

Обработка экспериментальных данных показала (рис. 2), что отказ резцедержателей даже в одной из двух соседних линиях резания на опережающем шнеке является причиной увеличения P_m (при $V_n = 2,5$ м/мин) в 1,5 и 1,7 раза соответственно.

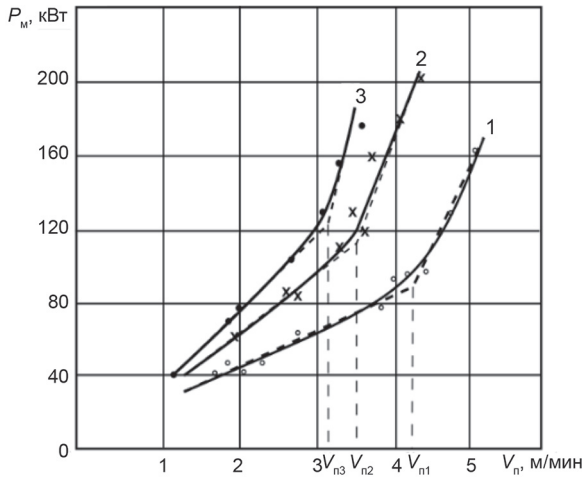


Рис. 2. Зависимости мощности P_m , потребляемой электродвигателями комбайна, работающего без отказа резцедержателей (кривая 1), при отказе резцедержателей в одной и двух соседних линиях резания (кривые 2 и 3) от скорости подачи V_f

Fig. 2. Motor input power P in cutter-loader operation without failure of cutter supports (curve 1) and in failure of cutter supports in one and two neighbor cutting line (curves 2 and 3) versus cutter-loader feed speed V_f

Обращает на себя внимание также то обстоятельство, что в каждом из рассматриваемых случаев (рис. 2) в определенных областях значений скоростей подачи (V_{n1} , V_{n2} , V_{n3}), уменьшающихся с повышением количества отказавших резцедержателей, нарушается прямолинейность зависимости $P_m = f(V_f)$, что связано с увеличением интенсивности роста мощности, потребляемой при дальнейшем нарастании скорости подачи.

На рис. 3 показана принципиальная схема влияния отказов резцедержателей на удельные энергозатраты при выемке (энергоемкость выемки) угля H_w и предельно допустимую скорость подачи комбайна $V_{пр.доп}$ по мере исчерпания ресурса исполнительного органа при отказах резцедержателей.

Установлено, что в зависимости от числа отказавших резцедержателей энергоемкость выемки угля можно определить по формулам:

- при $V_f \leq V_{пр.доп}$:

$$H_w = \frac{a + b_{от} V_f}{60 B_3 H_{пл} V_f \gamma_{уг}}, \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}; \quad (7)$$

- при $V_f > V_{пр.доп}$:

$$H_w = \frac{a + b_{от} V_f + c_{от} (V_f - V_{н.дон})}{60 B_3 H_{пл} V_f \gamma_{уг}}, \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}, \quad (8)$$

где a — величина, определяющая затраты мощности, когда комбайн стоит ($V_f = 0$), кВт; $b_{от}$ — коэффициент, учитывающий влияние на H_w прерывисто установившегося режима резания при отказах резцедержателей (изменяется от 1,0 при $n_{от} = 0$ до 1,8 при $n_{от} = 4$ и более); B_3 — фактическая ширина захвата исполнительного органа, м; $H_{пл}$ — вынимаемая мощность пласта, м; $\gamma_{уг}$ — плотность угля, т/м³; $c_{от}$ — коэффициент, учитывающий влияние на H_w контактирование лопасти шнека с неразрушенным целиком массивом.

Значения коэффициента $c_{от}$ определяются по формуле

$$c_{от} = \frac{(V_f - V_{пр.доп}) 10^2}{V_{пр.доп}}. \quad (9)$$

Увеличение потребляемой мощности и соответствующее увеличение удельных энергозатрат на выемку угля при

выходе из строя резцедержателей объясняется, с одной стороны, нарушением схемы расстановки, а с другой образованием межрезцовых целиков угля, препятствующих росту скорости подачи. Для оптимальной для конкретных условий эксплуатации схемы расстановки резцов нарушение прямолинейности зависимости $P_m = f(V_p)$ будет происходить [16], когда

$$V_{пр,доп} \geq \frac{l_p m_p n_{об}}{100k_l}, \text{ м/мин, (10)}$$

где l_p — радиальный вылет резца, см; m_p — число резцов в линии резания; $n_{об}$ — частота вращения шнекового исполнительного органа, об/мин; k_l — коэффициент вылета резца.

Так, для шнека со схемой расстановки по два радиальных резца в линии резания значение $V_{пр,доп}$ находится в пределах 4,0 — 4,5 м/мин (кривая 1 на рис. 2). При отказах резцедержателей, наряду с нарушением схемы расстановки резцов, увеличивается расстояние между линия-

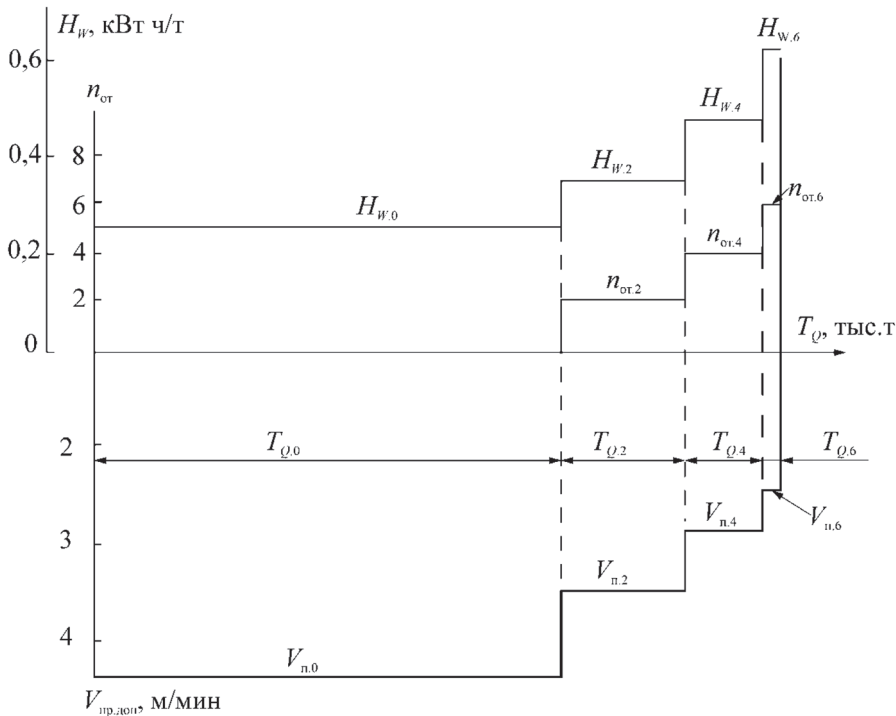


Рис. 3. Принципиальная схема влияния остаточного ресурса исполнительного органа на скорость подачи $V_{пр,доп}$ и энергоемкость выемки H_w : $n_{от,2}$, $n_{от,4}$, $n_{от,6}$ — число отказавших резцедержателей на опережающем шнеке (2, 4, 6); $H_{w,0}$, $H_{w,2}$, $H_{w,4}$, $H_{w,6}$ — энергоемкость выемки угля при работе комбайна с новым опережающим шнеком, с двумя, четырьмя и шестью отказавшими резцедержателями соответственно; $V_{n,0}$, $V_{n,2}$, $V_{n,4}$, $V_{n,6}$ — скорость подачи при работе комбайна с новым опережающим шнеком, с двумя, четырьмя и шестью отказавшими резцедержателями соответственно; $T_{Q,0}$, $T_{Q,2}$, $T_{Q,4}$, $T_{Q,6}$ — время работы комбайна без снижения производительности при отказе двух, четырех и шести резцедержателей соответственно

Fig. 3. Flow chart of influence exerted by remaining life of cutting drum on feed speed V_f and cutting energy content H_w : 2, 4, 6 — numbers of failed cutter supports on front cutting drum; $H_{w,0}$, $H_{w,2}$, $H_{w,4}$, $H_{w,6}$ — energy contents of coal cutting with new front cutting drum, as well as with 2, 4 and 6 failed cutter supports, respectively; $V_{f,0}$, $V_{f,2}$, $V_{f,4}$, $V_{f,6}$ — feed speeds of cutter-loader with new front cutting drum, as well as with 2, 4 and 6 failed cutter supports, respectively; $T_{Q,0}$, $T_{Q,2}$, $T_{Q,4}$, $T_{Q,6}$ — operation times of cutter-loader without drop in capacity in case of failure of 2, 4 and 6 cutter supports, respectively

ми резания и межрезцовые целики неразрушенного угля, о которые трется торец лопасти, что и приводит уменьшению $V_{\text{пр.доп}}$ (кривые 2 и 3 на рис. 2).

Значения предельно допустимых скоростей подачи $V_{\text{пр.доп}}$ зависят от радиального вылета резца типа комбайна и числа отказавших резцедержателей в определенных условиях эксплуатации. В тех условиях (угольные пласты сложного строения с высокой сопротивляемостью резанию), где энерговооруженность комбайна не позволяет достичь предельных по вылету резцов скоростей подачи, нарушение прямолинейности зависимости $H_w = f(V_n)$ при $n_{\text{от}} = 0$ не происходит.

Потерю производительности комбайна при отказах резцедержателей $\Delta q_{\text{т.от.рд}}$, согласно схеме на рис. 3, можно представить в виде

$$\Delta q_{\text{т.от.рд}} = 60B_3 \gamma_{\text{yz}} (V_{n,0} - 0,01V_{n,0} T_{Q,0} - 0,01V_{n,1} T_{Q,1} - \dots - 0,01V_{n,n} T_{Q,n}) \quad (11)$$

Тогда среднее значение теоретической производительности для i -го числа отказавших резцедержателей равно

$$q_{\text{т.от.рд}} = \bar{q}_r - \Delta q_{\text{т.от.рд}}, \text{ т/ч.} \quad (12)$$

Величина \bar{q}_r определяется:

- при постепенной замене резцов:

$$\bar{q}_r = 60B_3 H_{nn} \gamma_{\text{yz}} V_{n,s}, \text{ т/ч,} \quad (13)$$

где $V_{n,s}$ — средняя скорость подачи комбайна при работе со среднестатистической площадкой затупления резцов на исполнительном органе, определяемой по графикам на рис. 1;

- при регламентированной замене резцов по формуле (3).

Потери добычи определяются по формуле

$$\Delta Q_{\text{от.рд}} = \Delta q_{\text{т.от.рд}} t_{\text{м.с}}, \quad (14)$$

где $t_{\text{м.с}}$ — машинное время работы комбайна со среднезатупленным комплектом резцов на исполнительных органах, ч.

Определение технической производительности комбайна по мере истощения ресурса исполнительного органа

Величина технической производительности $q_{\text{тех}}$ зависит от продолжительности цикла по выемке угля $\sum T_{\text{ц}}$ с учетом непроизводительных потерь времени $T_{\text{ц}}$ за цикл, вызванных технологическими особенностями работы комбайна и остановами для устранения его отказов. Потери времени $T_{\text{ц}}$ и их влияние на $q_{\text{тех}}$ зависят от коэффициента прогрессивности комбайна $K_{\text{тех}}$ [16], с учетом которого

$$q_{\text{тех}} = 60K_{\text{тех}} \bar{q}_r. \quad (15)$$

В свою очередь

$$K_{\text{тех}} = \frac{1}{1 + (V_n / L) T_u}, \quad (16)$$

где L — длина лавы, м.

Тогда с учетом выражений (13) и (16), имеем

$$q_{\text{тех}} = \frac{60B_3 H_{nn} \gamma_{\text{yz}} V_{n,s}}{1 + (V_n / L) T_u}, \text{ т/ч.} \quad (17)$$

Величина $T_{\text{ц}}$, наряду с потерями времени на выполнение технологических операций и на устранение отказов забойного оборудования зависит от времени, необходимого для замены вышедших из строя резцов $T_{\text{з.р}}$ и шнеков $T_{\text{з.ш}}$, не совмещенного с остановами комбайна по другим причинам.

$$T_{\text{з.р}} = N_{\text{y.p}} t_{\text{р}} Q_{\text{ц}} k_c, \text{ ч,} \quad (18)$$

где $N_{\text{y.p}}$ — удельный расход резцов (определяется по шахтным нормам расхода), шт/1000 т; $t_{\text{р}}$ — время на замену одного резца (обычно 1,0–1,5 мин с учетом осмотра шнеков); k_c — коэффициент, учитывающий часть времени на замену резцов, не совмещенного с остановами комбайна по другим причинам (обычно $k_c = 0,7 \dots 0,8$).

$$T_{\text{з.ш}} = r_{\text{ш}} t_{\text{ш}} Q_{\text{ц}} k_b, \text{ ч,} \quad (19)$$

где $r_{\text{ш}}$ — частота отказов шнеков (число отказов, приходящихся на 1000 т добы-

ваемой горной массы); $t_{\text{ш}}$ — продолжительность замены шнека, ч; $k_{\text{в}}$ — коэффициент, учитывающий вынужденные простои комбайна, связанные с внезапными отказами шнеков.

Причины вынужденных простоев комбайнов обычно связаны с внезапными отказами элементов и узлов крепления шнека на валу привода, что требует немедленной замены исполнительного органа. Поэтому величина $k_{\text{в}}$ при выполнении расчетов принимается по доле (от единицы) таких отказов в общей структуре отказов шнека. В зависимости от прочностных характеристик она составляет от 0,05... 0,1 при выемке пластов простого строения (без наличия крепких породных прослоек и крупных твердых включений) до 0,2... 0,3 при выемке пластов сложного строения [9]. Другие отказы шнеков проявляются в постепенном накоплении повреждений их элементов (износ лопастей, отрыв, поломка и износ резцедержателей), поэтому их устранение возможно планировать и совмещать с технологическими перерывами в работе лавы (например, в ремонтные смены) без ущерба для добычи.

Снижение технической производительности, связанное с заменой резцов и шнеков, определяется по формуле

$$\Delta q_{\text{мех}} = q'_{\text{мех}} - \frac{60Q_{\text{ц}}}{T_{\text{м}} + T_{\text{з.р}} + T_{\text{з.ш}}} = q'_{\text{мех}} - q_{\text{мех.ш}}, \text{ т/ч}, \quad (20)$$

Таблица 2

Параметры логарифмически-нормального распределения $t_{\text{ш}}$
Parameters of log-normal distribution $t_{\text{ш}}$

Диаметр шнека, м	Пределы изменения простоев комбайнов $t_{\text{ш}}$, ч (от—до)	Средние значения $t_{\text{ш}}$, ч	Мода M_{int}	Среднеквадратическое отклонение $\sigma_{\text{т}}$	Дисперсия $\sigma_{\text{т}}^2$	Коэффициент вариации v_0 , %
0,8	1—6	3,2	1,0	0,34	0,12	32,2
1,0; 1,25	1—7	3,5	1,2	0,26	0,07	25,5
1,4; 1,6	1—14	5,4	1,6	0,58	0,33	63,7
1,8; 2,0	1—21	6,1	1,7	0,42	0,18	45,7

где $q'_{\text{тех}}$, $q_{\text{тех.ш}}$ — техническая производительность соответственно без учета и с учетом продолжительности замены резцов и шнеков в целом, т/ч; $T_{\text{м}}$ — продолжительность работы комбайна по выемке объема добычи $Q_{\text{ц}}$ с производительностью $q_{\text{тех}}$, ч.

Соответственно снижение добычи по этим причинам равно

$$\Delta Q_{\text{з.ш}} = \Delta q_{\text{мех}} (T_{\text{з.р}} + T_{\text{з.ш}}), \quad (21)$$

а удельное снижение добычи

$$\Delta Q_{\text{з.ш.у}} = \Delta q_{\text{мех}} (t_{\text{з.р}} + t_{\text{з.ш}}). \quad (22)$$

В процессе шахтных наблюдений установлено, что простои комбайнов из-за замены отказавших шнеков $t_{\text{ш}}$ зависят от многих факторов (масса шнеков, вынимаемая мощность пласта, местонахождение нового шнека на момент отказа и др.). Анализ статистических данных о времени $t_{\text{ш}}$ позволил установить, что их значения достаточно точно описываются логарифмически-нормальным законом распределения, что, по-видимому, связано с большим числом независимых воздействий, накопление которых приводит к увеличению времени простоев комбайна. Параметры распределения (табл. 2) показывают, что по мере увеличения диаметра шнеков, а следовательно, и его массы, средние значения времени замены $t_{\text{ш}}$ и мода их логарифмов M_{int} пропорционально возрастают.

Зная параметры распределения величины $t_{\text{ш}}$, можно с заданной вероятностью определить продолжительность

замены шнека данного диаметра. Полученные значения параметров распределения можно использовать в практических расчетах, связанных с установлением влияния надежности исполнительных органов на производительность очистных комбайнов.

Выводы

1. По мере исчерпания ресурса исполнительного органа, происходящего, главным образом, вследствие отказов резцедержателей, изменяются параметры схем расстановки режущего инструмента, которые, в свою очередь, влияют на режимные параметры очистного комбайна. С увеличением числа отказавших резцедержателей потребляемая комбайном мощность и удельные энергозатраты на выемку угля возрастают по криволинейной зависимости, а скорость подачи и производительность падают.

2. Рост нагруженности исполнительного органа комбайна и уменьшение

его скорости подачи при затуплении резцов и увеличении числа отказавших резцедержателей увеличивает удельные энергозатраты на выемку угля. При этом для каждого из чисел отказавших резцедержателей имеет место свой оптимум значений скорости подачи, при которых удельные энергозатраты минимальны.

3. Физическая сущность установленных закономерностей изменения потребляемой комбайном мощности и удельных энергозатрат на выемку в функции от скорости подачи и числа отказавших резцедержателей заключается, с одной стороны, в общем росте нагруженности исполнительного органа при вынужденном разрушении им межрезцовых целиков угля в местах отказавших резцедержателей, а с другой — в перераспределении нагрузок на исполнительном органе и в повышении тем самым динамичности процесса разрушения угольного массива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Линник Ю. Н., Жабин А. Б., Линник В. Ю., Поляков А. В. Оценка влияния отказов резцов и резцедержателей на показатели эффективности работы угледобывающих комбайнов // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. — 2018. — № 2. — С. 247–263.

2. Линник В. Ю., Линник Ю. Н., Жабин А. Б., Поляков А. В., Аверин Е. А. Нормирование расхода резцов угледобывающих комбайнов в зависимости от условий эксплуатации // Уголь. — 2019. — № 12. — С. 26–30.


3. Хорешок А. А., Маметьев Л. Е., Цехин А. М. Производство и эксплуатация разрушающего инструмента горных машин. — Томск: Изд-во ТПУ, 2013. — 296 с.

4. Прокопенко С. А. Повышение срока службы комбайновых резцов в угольных шахтах // Горное оборудование и электромеханика. — 2014. — № 1. — С. 24–28.

5. Прокопенко С. А. Повышение ресурсоэффективности при изготовлении и использовании горно-режущего инструмента // Современные научные исследования и инновации. [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2015/04/50499> (дата обращения: 15.10.2018).

6. Крестовоздвиженский П. Д., Клишин В. И., Никитенко С. М., Герике П. Б. Выбор формы армирующих вставок для тангенциальных поворотных резцов горных машин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2014. — № 6. — С. 107–115.

7. Романович А. С. Определение оптимального соотношения износостойкостей державки и вставки энергоэффективного тангенциального резца // Горное оборудование и электромеханика. — 2017. — № 1. — С. 24–29.

8. *ОСТ 12.44.258-84*. Комбайны очистные. Выбор параметров и расчет сил резания и подачи на исполнительных органах. Методика. — М.: Изд-во МУП СССР, 1985. — 108 с.
9. Валиев Н. Г., Голотвин А. Д., Кокарев К. В. Влияние горно-геологических условий на работу комбайна в лаве по челноковой схеме // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2012. — № 4. — С. 17–19.
10. Zich A., Linnik Yu. N., Linnik V. Yu. Verlängerung der Betriebsdauer von meiselhalterungen an schneidenden kohlegewinnungsmaschinen // Mining Report 5. Gluckauf. 2017, no. 153, pp. 474–479.
11. Gao K. D., Du C. L., Jiang H. X., Songyong L. A theoretical model for predicting the peak cutting force of conical picks // Frattura ed Integrità Strutturale. 2014, vol. 8, no. 27, pp. 43–52.
12. Liu Xiaohui, Geng Qi Effect of contact characteristics on the self-rotation performance of conical picks based on impact dynamics modelling // Royal Society Open Science. 2020, vol. 7, no. 5, article 200362. DOI: 10.1098/rsos.200362.
13. Qiao Shuo, Xia Jingyi, Xia Yimin, Liu Zaizheng, Liu Jinshu, Wang Ailun Establishment of coal-rock constitutive models for numerical simulation of coal-rock cutting by conical picks // Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2019, vol. 63, no. 2, pp. 456–464. DOI: 10.3311/PPci.13084.
14. Bołoz Łukasz. Conical picks for underground mining // New Trends in Production Engineering. 2020, vol. 3, no. 1, pp. 221–230. DOI: 10.2478/ntp-2020-0018.
15. Ордин А. А., Окольнішников В. В., Рудометов С. В., Метельков А. А. Оценка производительности очистного комбайна при изменяющихся горно-технических и геомеханических характеристиках угольного пласта // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2019. — № 1. — С. 64–73.
16. Позин Е. З., Меламед В. З., Тон В. В. Разрушение углей выемочными машинами. — М.: Недра, 1984. — 288 с. 

REFERENCES

1. Linnik Yu. N., Zhabin A. B., Linnik V. Yu., Polyakov A. V. Notes about how cutters and cutterholders malfunctions affect to indicators of coal plow machines work efficiency. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta, Nauki o zemle*. 2018, no. 2, pp. 247–263. [In Russ].
2. Linnik V. Yu., Linnik Yu. N., Zhabin A. B., Polyakov A. V., Averin E. A. Rationing of the consumption of coal mining combine cutters depending on the operating conditions. *Ugol'*. 2019, no. 12, pp. 26–30. [In Russ].
3. Khoreshok A. A., Mamet'ev L. E., Tsekhin A. M. *Proizvodstvo i ekspluatatsiya razrushayushchego instrumenta gornykh mashin* [Production and operation of destructive tool mining equipment], Tomsk, Izd-vo TPU, 2013, 296 p.
4. Prokopenko S. A. Increasing the service life of combine cutters in coal mines. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2014, no. 1, pp. 24–28. [In Russ].
5. Prokopenko S. A. Increasing resource efficiency in the manufacture and use of mining and cutting tools. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii*, available at: <http://web.snauka.ru/issues/2015/04/50499> (accessed: 15.10.2018).
6. Krestovozdvizhenskiy P. D., Klishin V. I., Nikitenko S. M., Gerike P. B. Choosing the shape of reinforcing inserts for tangential rotary cutters of mining machines. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2014, no. 6, pp. 107–115. [In Russ].
7. Romanovich A. S. Determination of the optimal ratio of the wear resistance of the holder and the insert of an energy-efficient tangential cutter. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2017, no. 1, pp. 24–29. [In Russ].
8. *Kombayny ochistnye. Vybora parametrov i raschet sil rezaniya i podachi na ispolnitel'nykh organakh. Metodika OST 12.44.258-84* [Cleaning combines. Selection of parameters and calculation of cutting forces and feed on the executive bodies. Methodology. Industry standard 12.44.258-84], Moscow, Izd-vo MUP SSSR, 1985, 108 p.

9. Valiev N. G., Golotvin A. D., Kokarev K. V. Influence of mining and geological conditions on the operation of the combine in lava according to the shuttle scheme. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2012, no. 4, pp. 17 – 19. [In Russ].

10. Zich A., Linnik Yu. N., Linnik V. Yu. Verlängerung der Betriebsdauer von Meißelhalterungen an schneidenden Kohlegewinnungsmaschinen. *Mining Report 5. Gluckauf*. 2017, no. 153, pp. 474 – 479.

11. Gao K. D., Du C. L., Jiang H. X., Songyong L. A theoretical model for predicting the peak cutting force of conical picks. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2014, vol. 8, no. 27, pp. 43–52.

12. Liu Xiaohui, Geng Qi Effect of contact characteristics on the self-rotation performance of conical picks based on impact dynamics modelling. *Royal Society Open Science*. 2020. vol. 7, no. 5, article 200362. DOI: 10.1098/rsos.200362.

13. Qiao Shuo, Xia Jingyi, Xia Yimin, Liu Zaizheng, Liu Jinshu, Wang Ailun Establishment of coal-rock constitutive models for numerical simulation of coal-rock cutting by conical picks. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2019, vol. 63, no. 2, pp. 456–464. DOI: 10.3311/PPci.13084.

14. Bołoz Łukasz. Conical picks for underground mining. *New Trends in Production Engineering*. 2020, vol. 3, no. 1, pp. 221 – 230. DOI: 10.2478/ntpe-2020-0018.

15. Ordin A. A., Okol'nishnikov V. V., Rudometov S. V., Metel'kov A. A. Evaluation of the performance of a cleaning combine with changing mining and geomechanical characteristics of a coal seam. *Fiziko-tehnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2019, no. 1, pp. 64 – 73. [In Russ].

16. Pozin E. Z., Melamed V. Z., Ton V. V. *Razrushenie ugley vyemochnymi mashinami* [Destruction of coals by dredging machines], Moscow, Nedra, 1984, 288 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Линник Юрий Николаевич¹ — д-р техн. наук, профессор,

Линник Владимир Юрьевич¹ — д-р экон. наук, доцент,

профессор, e-mail: vy_linnik@guu.ru,

Жабин Александр Борисович — д-р техн. наук, профессор,

Тульский государственный университет,

действительный член Академии горных наук,

Цих Алексей — д-р техн. наук, ответственный за энергоэффективность

и природоохрану, Ontex Hygieneartikel, Germany, Grospostwitz,

¹ Государственный университет управления.

Для контактов: Линник В.Ю., e-mail: e-mail: vy_linnik@guu.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yu.N. Linnik¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

V.Yu. Linnik¹, Dr. Sci. (Econ.), Assistant Professor,

Professor, e-mail: vy_linnik@guu.ru,

A.B. Zhabin, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

Tula State University, 300012, Tula, Russia,

Full Member of the Academy of Mining Sciences,

A. Zich, Dr. Sci. (Eng.), Energy and Environmental Management

Representative, Ontex Hygieneartikel, Germany, Grospostwitz,

¹ State University of Management, 109542, Moscow, Russia.

Corresponding author: V.Yu. Linnik, e-mail: e-mail: vy_linnik@guu.ru.

Получена редакцией 06.09.2021; получена после рецензии 16.09.2021; принята к печати 10.10.2021.

Received by the editors 06.09.2021; received after the review 16.09.2021; accepted for printing 10.10.2021.