

## ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ ВЫЕМОЧНЫХ МАШИН НА ПРОЦЕСС РАЗРУШЕНИЯ И ПОГРУЗКУ УГЛЯ

В.Н. Захаров<sup>1</sup>, Ю.Н. Линник<sup>2</sup>, В.Ю. Линник<sup>2</sup>, А.Б. Жабин<sup>3</sup>, А. Цих<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Государственный университет управления, Москва, Россия,  
e-mail: vy\_linnik@guu.ru

<sup>3</sup> Тульский государственный университет, Тула, Россия

<sup>4</sup> Фрайбургская академия, MS QF GmbH, Одервиц, Германия

**Аннотация:** В настоящее время в мировой и российской угольной промышленности при добыче угля в основном используются очистные комбайны и струговые установки, оснащенные принципиально отличающимися по конструктивному исполнению исполнительными органами. Эффективность разрушения ими угольного забоя и погрузки отбитого угля на забойный конвейер зависит как от характеристик разрушаемости угольного пласта, так и от конструктивных параметров и особенностей исполнительных органов, которые накладывают технические ограничения на процесс добычи угля. Изложены результаты экспериментальных исследований влияния параметров процесса резания угля комбайновыми и струговыми исполнительными органами и характеристик разрушаемости угольного массива на эффективность разрушения угольного массива, оцениваемую удельными энергозатратами на резание. Предложены расчетные зависимости для определения среднего истинного сечения стружки ( $\text{см}^2$ ) применительно к работе комбайнов и струговых установок, оснащенных различными по конструкции исполнительными органами в функции от их режимных параметров, параметров схем расстановки резцов на исполнительных органах и характеристик разрушаемости пласта. Установлена зависимость толщины стружки и скорости подачи комбайна от этого показателя и выявлены расчетные зависимости для определения. Предложены уравнение для определения транспортирующей способности шнекового исполнительного органа и оптимальное (критическое) соотношение между скоростями резания и подачи комбайна, обеспечивающее эффективную выгрузку угля из зоны разрушения на забойный конвейер.

**Ключевые слова:** угольный пласт, комбайн, исполнительный орган, сопротивляемость резанию, толщина стружки, скорость подачи, процесс резания, резец, шаг резания, площадь потока угля, высота погрузки, транспортирующая способность.

**Для цитирования:** Захаров В. Н., Линник Ю. Н., Линник В. Ю., Жабин А. Б., Цих А. Влияние конструкции исполнительных органов выемочных машин на процесс разрушения и погрузку угля // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 3. – С. 5–16. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-3-0-5-16.

---

## Effect of mining machine cutting head design on coal fracture and loading efficiency

V.N. Zakharov<sup>1</sup>, Yu.N. Linnik<sup>2</sup>, V.Yu. Linnik<sup>2</sup>, A.B. Zhabin<sup>3</sup>, A. Zich<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup> State University of Management, Moscow, Russia, e-mail: vy\_linnik@guu.ru

<sup>3</sup> Tula State University, Tula, Russia

<sup>4</sup> Freiburg Academy, MS QF GmbH, Oderwitz, Germany

---

**Abstract:** Actually the coal mining industry both in Russia and in the world uses cutter-loaders and plough systems with cutting heads of vitally different designs. Efficiency of coal cutting and loading on an armored face conveyor is governed by both coal cuttability and design variables of cutting heads, which technically confine the process of coal cutting. This article describes the experimental research into the influence exerted by the cutting performance with cutter-loaders and plough systems, as well as by the coal cuttability on the coal cutting efficiency assessed in terms of specific energy consumption of coal cutting. The calculated dependences of the average actual cutting section (cm<sup>2</sup>), obtained with cutter-loaders and plough systems equipped with different-design cutting heads, as function of operating conditions, arrangement patterns of cutters on cutting heads and coal seam cuttability are presented. It is found that cutting thickness and mining machine advance velocity depend on the coal cuttability, and the related calculated dependences are determined. The equation is proposed for determining the carrying capacity of a screw cutting head and for optimizing the critical ratio of velocities of cutting and machine advance to ensure efficient coal outlet from the cutting zone to AFC.

**Key words:** coal seam, cutter-loader, cutting head, cuttability, cutting thickness, advance velocity, cutting process, cutter, cutting pitch, coal flow area, outlet height, carrying capacity.

**For citation:** Zakharov V. N., Linnik Yu. N., Linnik V. Yu., Zhabin A. B., Zich A. Effect of mining machine cutting head design on coal fracture and loading efficiency. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(3):5-16. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-3-0-5-16.

---

### Введение

Накопленные сведения о закономерностях процесса разрушения угольных пластов инструментами исполнительных органов выемочных машин, опубликованные российскими [1–4] и зарубежными исследователями [5–7], явились основанием для формулирования важных в методологическом отношении положений об оптимальности процессов разрушения, которые сводятся к следующему:

1. Рациональные в конкретных условиях эксплуатации параметры разрушения угольного массива определяют

исходный оптимум всего процесса отделения угля в забое;

2. Оптимальному процессу отделения угля от массива соответствуют минимальная энергоемкость резания, определяющая наибольшую производительность, лучшую сортность угля и наименьшее пылеобразование при разрушении забоя;

3. Основным и определяющим параметром, характеризующим закономерности изменения энергоемкости процесса резания, является толщина стружки, при увеличении которой удельные энергозатраты снижаются. Каждому из

значений толщины стружки при резании соответствует определенная величина ее ширины, при которой удельные энергозатраты минимальны;

4. Технические, технологические и экономические ограничения при добыче угля в существенной мере определяют ограничения толщины стружки.

В данной статье рассматривается влияние технических ограничений на эффективность процесса разрушения.

При подготовке материалов статьи использовался экспериментально-статистический метод исследований, в рамках которого определялись характеристики разрушаемости угольных забоев (сопротивляемость угля резанию, удельное содержание породных прослоек и твердых включений с их прочностными характеристиками, мощность пласта и его хрупко-пластические свойства) и их функциональная связь с режимными параметрами угледобывающей машины.

### Влияние конструкции исполнительного органа на параметры процесса резания

Как известно [1], по принципу отделения угля от массива исполнительные органы угледобывающих машин подразделяются на осуществляющие сплошное и щелевое резание, в связи с чем различают соответственно истинное  $S_{и}$  и условное  $S_y$  сечения стружки. Причем, в отличие от  $S_{и}$ , значения  $S_y$  определяются отношением всей площади обрабатываемого забоя к суммарной площади нарезаемых резцами щелей.

Выполненные исследования позволили получить формулы для расчета среднего истинного сечения стружки  $\bar{S}_{и}$  (см<sup>2</sup>) в зависимости от конструктивного исполнения исполнительного органа очистных комбайнов:

1. Для исполнительных органов с горизонтальной осью вращения:

- опережающего

$$\bar{S}_{и} = 2B_3 V_n \cdot 10^4 / (\pi n_{л1} m_{p1} n_{об1}) \quad (1)$$

- отстающего

$$\bar{S}_{и} = \frac{2B_3 V_n (H_{пл} - D_1) \cdot 10^4}{n_{л2} m_{p2} n_{об2} D_2 \left[ \frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{2}{D_2} \left( H_{пл} - D_1 - \frac{D_2}{2} \right) \right]} \quad (2)$$

В этих формулах:  $B_3$  — ширина захвата исполнительного органа, м;  $V_n$  — скорость подачи, м/мин;  $H_{пл}$  — вынимаемая мощность пласта, м;  $D_1$  и  $D_2$  — диаметр по резцам шнека опережающего и отстающего соответственно, м;  $n_{об1}$  и  $n_{об2}$  — частота вращения исполнительного органа, соответственно опережающего и отстающего, об/мин;  $n_{л1}$  и  $n_{л2}$  — число линий резания соответственно на опережающем и отстающем исполнительных органах;  $m_{p1}$  и  $m_{p2}$  — число резцов в линии резания на опережающем и отстающем исполнительных органах соответственно.

2. Для барабанных исполнительных органов с вертикальной осью вращения:

- при диаметре, меньшем или равном ширине захвата

$$\bar{S}_{и} = 2H_{пл} V_n \cdot 10^4 / (\pi n_{л} m_p n_{об}); \quad (3)$$

- при диаметре, большем ширины захвата

$$\bar{S}_{и} = \frac{2B_3 H_{пл} V_n 10^4}{n_{л} m_p n_{об} D \left[ \frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{2}{D} \left( B_3 - \frac{D}{2} \right) \right]} \quad (4)$$

В этих формулах:  $D$  — диаметр по резцам исполнительного органа, м;  $n_l$  — число линий резания;  $m_p$  — число резцов в линии резания;  $n_{об}$  — частота вращения исполнительного органа.

Значение скорости подачи  $V_n$  при прочих равных условиях является, как известно, функцией толщины стружки  $h$ , зависящей от характеристик разрушаемости угольного массива. В большинстве существующих методик выбора параметров исполнительных органов угледобывающих машин при выполнении расчетов по определению силовых и энергетических показателей процесса резания в качестве величины, совокупно учитывающей характеристики разрушаемости угольного массива, принята сопротивляемость пласта резанию  $A_{пл}$  (Н/мм) [1, 8–12], иногда временное сопротивление одноосному сжатию и растяжению (методика Эванса) [13, 14].

Однако данный показатель, являясь средневзвешенной величиной сопротивляемости резанию угля и содержащихся в пласте твердых, включая и породные прослойки, не учитывает динамическую сторону процесса резания пластов сложного строения. В этой связи предлагается в расчетах использовать вместо  $A_{пл}$  предложенный авторами ранее показатель эквивалентной сопротивляемости пласта резанию  $A_3$ , численно равный сумме сопротивляемости угля резанию  $A_{уг}$  и обобщенного показателя содержания и свойств неоднородностей в пласте  $A_n^*$  ( $A_3 = A_{уг} + A_n^*$ ) [15].

Зависимости средней  $h_{cp}$  и максимальной  $h_{max}$  толщины стружки (см) в функции показателя  $A_3$  определяются по следующим выражениям:

$$h_{cp} = \frac{300k_{м.к}}{A_3^{0,9} m_p} \quad (5)$$

$$h_{max} = \frac{66,2k_{м.к} k_p}{A_3^{1,36} m_p} 10^2, \quad (6)$$

где  $k_{м.к}$ ,  $k_p$  — коэффициенты, определяющие влияние на толщину стружки установленной мощности комбайна и радиального вылета резца соответственно;  $m_p$  — число резцов в линии резания на исполнительном органе.

Статистическая проверка значимости взаимосвязи  $h_{cp}$  и  $h_{max}$  с  $A_3$  показала, что в обоих случаях индекс корреляции зависимостей был не менее 0,83, что вполне приемлемо для выполнения инженерных расчетов.

Экспериментально установлено следующее эмпирическое выражение для  $k_{м.к}$

$$k_{м.к} = (9,4P_k + 8,5A_3)10^{-3} - 1,6, \quad (7)$$

где  $P_k$  — установленная мощность комбайна (кВт).

Для радиальных и тангенциальных призматических резцов с радиальным вылетом  $l_p = 70 \div 80$  мм, значения  $k_p$  в расчетах следует принимать равным 1,0. Для поворотных резцов типа РГ с  $l_p = 45 \div 50$  мм  $k_p = 0,65$ , а для резцов РО100 с  $l_p = 100$  мм  $k_p = 1,2$ .

Учитывая, что скорость подачи комбайна (м/мин)

$$V_n = 0,01hn_{об} \quad (8)$$

и подставляя вместо  $h$  полученные для него выражения для определения  $h_{cp}$  (5) или  $h_{max}$  (6), имеем:

$$V_{н.ср} = \frac{3k_{м.к}n_{об}}{A_3^{0,9}n_{р.л}} \quad (9)$$

$$V_{н.макс} = \frac{6,22k_{м.к}k_p n_{об}}{A_3^{1,36}n_{р.л}} \quad (10)$$

Общее число линий резания  $n_l$  в зависимости от конструктивного исполнения исполнительного органа определяется по формулам:

1. Для исполнительных органов с горизонтальной осью вращения

$$n_l = (B_3 / t'_{cp}) + 1 \quad (11)$$

2. Для исполнительных органов с вертикальной осью вращения

$$n_l = H_{пл} / t'_{cp} \quad (12)$$

где  $t'_{cp}$  — средний шаг резания, м.

Приведенные выше формулы позволяют определять режимные параметры по известным конструктивным данным из чертежа исполнительного органа и заданным величинам производительности.

Одним из основных конструктивных параметров струговых исполнительных органов являются высоты их башни — минимальная  $H_{c.min}$  (см) и максимальная  $H_{c.max}$  (см), которые определяются по выражениям:

$$H_{c.min} = H_{\Pi} + 0,48H_{пл.min} h_{max} + \Delta_{p.в} \quad (13)$$

$$H_{c.max} = (0,7 \dots 0,8)H_{пл.max} \quad (14)$$

где  $H_{\Pi}$  — высота погрузки угля на конвейер, см;  $H_{пл.max}$  и  $H_{пл.min}$  — максимальная и минимальная мощность пласта, см;  $h_{max}$  — максимальная толщина стружки для принятых режимов работы струговой установки, см;  $\Delta_{p.в}$  — превышение верхнего (подрезного) реза над верхней проставки корпуса струга, см (обычно  $\Delta_{p.в} = 3 \div 5$  см).

Оптимальное значение шага резания для струговых резцов рассчитывается по выражению

$$t_{opt_i} = \left[ \frac{7,5h_i}{h_i + 0,65} + 0,3h_i + (B_{pi} - 2) \right] k_{ш} \text{ см}, \quad (15)$$

где  $B_{pi}$  — расчетная ширина режущей части реза (определяется в зависимости от формы режущей кромки и поверхности реза), см;  $h_i$  — текущее значение толщины стружки на  $i$ -м резе за оборот исполнительного органа при установившемся режиме резания, см.

Число линий резания для минимальной (максимальной) высоты струга

$$N_{л.min(max)} = (H_{c.min(max)} / t') + 1 \quad (16)$$

### **Влияние конструкции исполнительных органов на транспортирующую способность**

Эффективность работы любой угледобывающей машины существенно за-

висит от того, насколько свободно отбитый уголь грузится на забойный конвейер. Для этого необходимо, чтобы транспортирующая способность исполнительного органа (его производительность по погрузке) обеспечивала вынос из зоны разрушения всего отделенного от пласта угля.

Несмотря на то, что исполнительные органы угледобывающих машин различных типов (комбайны, струговые установки и др.) принципиально отличаются по своим конструктивным характеристикам, для них существует общая закономерность — скорость перемещения отбитой от забоя горной массы в направлении транспортирования меньше скорости резания угля [16, 17], а при встречном вращении исполнительного органа и увеличении скорости подачи увеличивается площадь потока угля, расположенного в рабочем пространстве [18–19].

В этой связи решение задачи эффективной погрузки угля сводится к определению показателей, количественно отражающих соотношение этих скоростей.

В данной статье не рассматриваются решения задач по погрузочной способности цепных исполнительных органов врубных машин и барабанных — для добычных комбайнов, поскольку первые как в мировой, так и отечественной практике угледобычи практически не применяются, а вторые находят применение только на комбайнах для крутых пластов, где удаление продуктов разрушения не сдерживает работу машины.

### *Шнековые исполнительные органы*

Погрузочные характеристики шнековых исполнительных органов (в дальнейшем изложении шнеки) имеют следующие особенности (рис. 1):

- из-за частичного перекрытия погрузочного окна (выходного сечения шнека) корпусом редуктора и бортом кон-

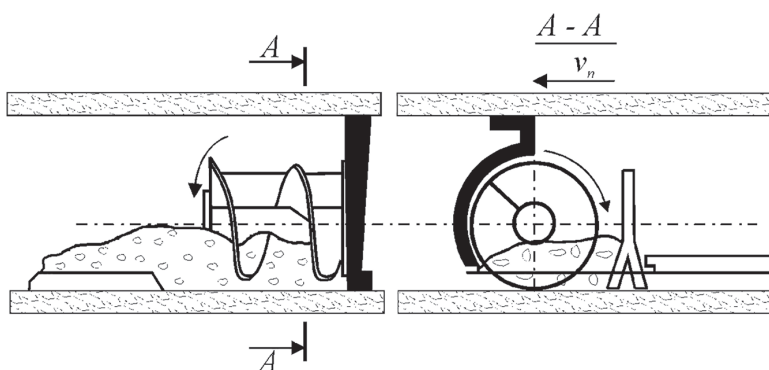


Рис. 1. Схема погрузки угля при работе шнекового исполнительного органа

Fig. 1. Schematic loading of coal in operation of screw cutting head

вейера дополнительно к силам трения суммируются сопротивления осевому перемещению отбитой горной массы;

- небольшая, соизмеримая с диаметром, длина шнека;
- увеличенное пространство между лопастями и корпусом шнека, ограниченное забоем и погрузочным щитком;
- совместная работа по погрузке шнека и конвейера.

Эти особенности, особенно при несогласованности скоростей вращения и подачи шнека, могут приводить к отставанию транспортирования в осевом направлении, циркуляции и перебросу отбитого угля.

Уравнение для определения транспортирующей способности шнекового исполнительного органа в общем виде может быть представлено как

$$Q_{\text{тр}} \geq k_1 Q_k - q_n, \quad (17)$$

где  $Q_k$  — производительность комбайна;  $\text{м}^3/\text{мин}$ ;  $k_1$  — коэффициент, учитывающий часть угля подлежащего погрузке;  $q_n$  — объем непогруженного угля, оставшегося на почве пласта.

Оптимальное (критическое) соотношение между скоростями резания и подачи комбайна имеет вид

$$\left( \frac{V_n}{V_p} \right)_{\text{кр}} \geq \frac{B_3 D (H_{\text{нн}} k_1 \lambda_p - H_0)}{15 (D_{\text{ш}}^2 - d_{\text{ш}}^2) \left( S' - \frac{\delta_{\text{ш}} N_3}{\cos \alpha_{\text{ш}}} \right) \psi_n}, \quad (18)$$

где  $D_{\text{ш}} = D - 2l_p$  — диаметр шнека по винтовой поверхности, м;  $l_p$  — радиальный вылет резца, м;  $\lambda_p \cong 1,8$  — коэффициент разрыхления угля;  $H_0$  — высота непогруженного слоя угля, м;  $d_{\text{ш}}$  — диаметр ступицы шнека (рекомендовано принимать не более  $d_{\text{ш}} \leq 0,4D$ );  $S'$  — ход шнека, м;  $\delta_{\text{ш}}$  — толщина лопасти (принимается минимальной исходя из конструктивных возможностей), м;  $\alpha_{\text{ш}}$  — угол подъема винта (лопасти) шнека, град (большим значениям  $D_{\text{ш}}$  соответствуют большие значения  $\alpha_{\text{ш}}$ );  $N_3$  — число заходов шнека;  $\psi_n$  — коэффициент использования проходного сечения шнека (определяется экспериментально при работе на грани заштыбовки).

Для конструкций, в которых резцедержатели выступают за торец лопасти, значение приведенного диаметра шнека определяется по выражению

$$D_{\text{ш.пр}} = \sqrt{D_{\text{ш}}^2 + \left[ \frac{4360(F_k + F_p)}{\pi \beta_k} \right]} \quad (19)$$

где  $F_k$  и  $F_p$  — площади боковых поверхностей резцедержателя и резца,  $\text{м}^2$ ;  $\beta_k$  — средний центральный угол между двумя соседними резцедержателями, град.

Ход шнека  $S'$  равен:

$$S' = \pi D_{\text{ш}} \text{tg} \alpha_{\text{ш}} \quad (20)$$

Угол подъема винта шнека  $\alpha_{\text{ш}}$  рекомендуется принимать для диаметров шнеков  $D_{\text{ш}} = 0,6 \dots 2,0$  м равным от  $27^\circ$  до  $14^\circ$ .

Таблица 1

**Значения коэффициента  $\psi_n$  использования сечения шнекового исполнительного органа**  
**Values of utilization factor  $\psi_n$  of screw cutting head cross-section**

Отношение $F_0 / F_n$	Диаметр шнека $D_{ш}$ , м				
	0,5	0,71	1,0	1,25	1,8–2,0
0,3	0,11 – 0,13	0,13 – 0,21	0,14 – 0,25	0,16 – 0,27	0,17 – 0,30
0,5	0,17 – 0,20	0,21 – 0,28	0,24 – 0,34	0,26 – 0,36	0,29 – 0,39
0,7	0,23 – 0,25	0,29 – 0,32	0,33 – 0,37	0,36 – 0,40	0,40 – 0,44
1,0	0,26 – 0,32	0,34 – 0,41	0,40 – 0,48	0,42 – 0,55	0,46 – 0,58

Число заходов шнека из условия эффективной транспортировки угля должно быть  $N_3 \geq S' / B_3$ .

Параметрами, определяющими погрузочную способность шнека, являются:

- площадь потока угля  $F_n$

$$F_n = \left( \frac{\pi}{4S'} \right) (D_{ш.нр}^2 - d_{ш}^2) \cdot \left[ S' - \left( \frac{\delta_{ш} N_3}{\cos \alpha_{ш}} \right) \right], \text{ м}^2; \quad (21)$$

- площадь погрузочного окна  $F_0$ , которую рекомендуется принимать при конструировании шнека  $F_0 \geq (0,5 \dots 0,7) F_n$ .

При расчетах значения коэффициента использования сечения шнека  $\psi_n$  рекомендуется принимать по данным табл. 1.

Для случаев погрузки угля с бермы (когда грузит верхний шнек) значения  $\psi_n$  необходимо принимать большие значения из указанного диапазона для  $F_0 / F_n = 1$ .

Высота непогруженного слоя угля  $H_0$  при работе с подпором погружаемого угля щитком принимается в пределах до 0,05 м, а без щитка определяется по формуле

$$H_0 = \mu D, \quad (22)$$

где  $\mu$  – коэффициент, учитывающий непогруженную часть угля на почве или

Таблица 2

**Значения коэффициента  $\mu$**   
**Values of ratio  $\mu$**

Подача, см/об	Диаметр шнека, м	Высота погрузки, м								
		0,00			0,18			0,30		
		Отношение $F_0 / F_n$			Отношение $F_0 / F_n$			Отношение $F_0 / F_n$		
		0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7
3	0,63	0,44	0,35	0,25	0,60	0,50	0,45	–	–	–
	1,00	0,22	0,20	0,15	0,25	0,20	0,18	–	–	–
	1,80–2,0	0,20	0,10	0,04	0,20	0,14	0,08	0,31	0,17	0,11
5	0,63	–	0,45	0,35	–	0,65	0,55	–	–	–
	1,00	0,39	0,25	0,20	0,35	0,30	0,27	–	–	–
	1,80–2,0	0,37	0,24	0,14	0,32	0,28	0,18	0,49	0,31	0,21
7	0,63	–	0,55	0,45	–	–	0,60	–	–	–
	1,00	0,48	0,40	0,30	0,50	0,40	0,35	–	–	–
	1,80	0,46	0,36	0,23	0,50	0,39	0,28	0,59	0,42	0,31
10	0,63	0,60	0,45	0,34	0,68	0,53	0,42	–	–	–
	1,80–2,0	0,58	0,42	0,30	0,65	0,50	0,40	0,70	0,54	0,43

берме (принимается по данным табл. 2);  $D$  – диаметр шнека с учетом радиального вылета резцов.

Критическое значение толщины стружки, превышение которого влечет за собой заштыбовку, равно

$$h_{кр} = \frac{50(D_w^2 - d_w^2) \left( S' - \frac{\delta_w N_3}{\cos \alpha_w} \right) \varphi_n}{B_3 m_p (H_{пл} k_1 \lambda_p - H_0)} \cdot (23)$$

В случаях несогласованности скорости резания и подачи могут иметь место перебросы кусков отбитого угля в отработанное пространство. Для исключения такого явления должно соблюдаться условие

$$n_{об.кр} \leq n_{об} < n_{об.пер} \quad (24)$$

где  $n_{об.кр}$  и  $n_{об.пер}$  – критические частоты вращения по условиям предотвращения заштыбовки и исключения переброса угля соответственно.

#### Струговые исполнительные органы

При работе струговых установок отделенный от массива уголь падает в пространство между конвейером и забоем. При этом формируется штабель, который перемещается по почве пласта и создает усилия подпора, достаточные для подъема угля на высоту борта конвейера, затем грузится на конвейер. Установившийся режим погрузки возникает в случаях, когда объемы добытого и погруженного на конвейер угля в единицу времени становятся равными. В работе [20] предложено штабель (тело волочения) разделить (линия  $AB$  на рис. 2) на

две зоны: зона  $I$ , в которой осуществляется подъем угля на высоту погрузки  $H_n$ , и зона  $II$ , где происходит перемещение угля от забоя на конвейер. Согласно приведенной схеме (рис. 2) минимальные значения площадей погрузочных устройств должны быть:

- в зоне  $I$

$$S_1 = 2h_{cp} (H_{пл} + H_n - H_c) / \sin \alpha_1 \quad (25)$$

- в зоне  $II$

$$S_2 = 2h_{cp} H_{пл} / \sin \rho \quad (26)$$

В формулах (25) и (26)  $\alpha_1$  и  $\rho$  – углы наклона погрузочной поверхности башни струга относительно почвы пласта и груди забоя соответственно, град.

Высота струга  $H_c$  выбирается такой, чтобы образующееся сечение окна погрузки было достаточным для пропуска транспортируемого угля, т.е.

$$H_{c.min} = H_n + H_0 + \Delta_p \quad (27)$$

где  $\Delta_p$  – превышение верхнего резца относительно плоскости верхней проставки.

Высота окна погрузки

$$H_0 = \frac{2H_{пл} h_{cp} \lambda_{cp}}{[H_n (ctg \alpha_1 + ctg \Theta_1 + b_c ctg \rho)]} \quad (28)$$

где  $b_c$  – ширина погрузочной поверхности струга;  $\Theta_1$  – угол, зависящий от угла наклона погрузочной поверхности правой и левой частей корпуса струга.

Сила сопротивления погрузке угля стругом равна

$$F_n = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 \quad (29)$$

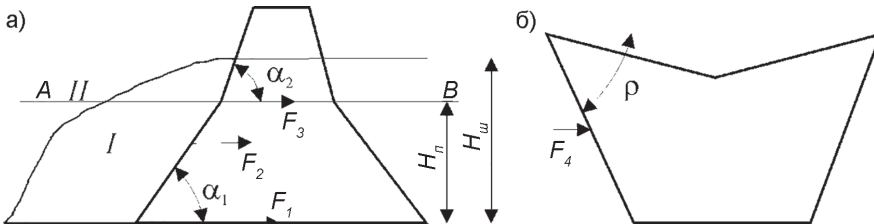


Рис. 2. Схема погрузки угля стругом: со стороны забоя (а); в плане (б)

Fig. 2. Schematic loading of coal in operation of plough system: from the face side (a); in plan view (b)



где  $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5$  — составляющие сил перемещения угля при погрузке, определяемые по формулам:

- сила внедрения погрузочной поверхности струга в уголь

$$F_1 = k_{b_c} b_c, \quad (30)$$

где  $k_{b_c}$  — коэффициент пропорциональности;

- составляющая силы перемещения угля по погрузочной поверхности в зоне I

$$F_2 = \left[ h_{cp} \gamma (H_{nn} + H_n + H_c) H_n \operatorname{ctg} \alpha_1 \right] \frac{(f_o + \operatorname{tg} \alpha_1)}{(1 - f_o \operatorname{tg} \alpha_1)} \quad (31)$$

где  $f_o$  — коэффициент трения угля по металлу;  $\gamma$  — плотность угля т/м<sup>3</sup>;

- составляющая силы перемещения угля по погрузочной поверхности в зоне II

$$F_3 = \frac{h_{cp} \gamma b_c (H_c + H_n + b_c \operatorname{tg} \varphi) \cos \rho (\sin \alpha_2 + f_o \cos \alpha_2)}{\cos(\alpha_2 - \alpha_1) - f_o \sin(\alpha_2 - \alpha_1) \cos \alpha_1} \quad (32)$$

где  $\varphi$  — угол естественного откоса отбитой от забоя горной массы;

- сила перемещения угля на конвейер

$$F_4 = \frac{k_p f_1 h_{cp} \gamma b_c^2 \operatorname{tg} \varphi \cos \rho}{(\cos \rho - f_o \sin \rho)}, \quad (33)$$

где  $f_1$  — коэффициент трения по углю;  $k_p$  — коэффициент, зависящий от режима работы струговой установки;  $\rho$  — угол между погрузочной поверхностью и направлением движения струга;

- сила сопротивления внутреннему трению в штабеле отбитой горной массы высотой  $H_w$  перед корпусом струга

$$F_5 = \frac{2H_n b_c}{\sin 2\Theta_1} \left[ \tau_0 + \mu \gamma \frac{H_w \sin(\alpha_1 + \Theta_1) \cos \Theta_1}{2 \sin \alpha_1} \right], \quad (34)$$

где  $\tau_0$  — прочность штабеля отбитой горной массы на сдвиг;  $\mu$  — коэффициент внутреннего трения.

Приведенные выше выражения для струговых установок следует также рассматривать как технические ограничения, так как в них входит толщина стружки  $h_{cp}$ , а она, как известно, является режимным параметром.

### Заключение

Таким образом, выполненные исследования позволяют определять оптимальные для конкретных условий эксплуатации режимные параметры комбайнов и струговых установок в зависимости от конструктивных параметров их исполнительных органов и характеристик разрушаемости угольных пластов, оцениваемых предложенным показателем эквивалентной сопротивляемости пласта резанию. Предложенные расчетные зависимости по оценке погрузочной способности исполнительных органов комбайнов и стругов позволяют рассчитывать оптимальное соотношение скоростей вращения и подачи исполнительного органа (для комбайнов) с учетом их конструктивных параметров, определять критическое (по предотвращению заштыбовки) значение толщины стружки, оптимальную высоту струга, а также другие параметры влияющие на эффективность транспортирующей способности различных по конструкции исполнительных органов угледобывающих машин.

Результаты исследований рекомендуют использовать специалистам и учебным проектно-конструкторских и исследовательских организаций при выполнении расчетов по выбору оптимальных

параметров исполнительных органов угледобывающих машин применительно к конкретным условиям эксплуатации по показателю эквивалентной сопротивляемости пластов резанию.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Позин Е. З., Меламед В. З., Тон В. В. Разрушение углей выемочными машинами. — М.: Недра, 1984. — 288 с.
2. Позин Е. З., Меламед В. З., Азовцева С. М. Измельчение углей при резании. — М.: Наука, 1977. — 138 с.
3. Линник Ю. Н., Линник В. Ю. Разрушение угольных пластов исполнительными органами комбайнов и стругов. — М.: Русайнс, 2020. — 430 с.
4. 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.
5. Qiangling Yao, Xuehua Li, Boyang Sun, Minghe Ju, Qundi Qu Numerical investigation of the effects of coal seam dip angle on coal wall stability // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2017. Vol. 100. Pp. 298–309.
6. Adam K. Schwartzkopff, Nouné S. Melkounian, Chaoshui Xu Fracture mechanics approximation to predict the breakdown pressure using the theory of critical distances // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2017. Vol. 95. Pp. 48–61.
7. Stoxreiter T., Martin A., Teza D., Galler R. Hard rock cutting with high pressure jets in various ambient pressure regimes // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018. Vol. 108. Pp. 179–188.
8. ОСТ 12.44.258-84. Комбайны очистные. Выбор параметров и расчета сил резания и подачи на исполнительных органах. Методика. — М.: изд-во Министерства угольной промышленности СССР, 1985. — 108 с.
9. Аксенов В. В., Хорешок А. А., Ананьев К. А., Ермаков А. Н. Обзор и анализ методик определения параметров резцовых исполнительных органов / Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности. Сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции. — Кемерово, 2014. — С. 92–94.
10. Комиссаров А. П., Прокопович Г. В., Глазырин С. С. Адаптация конструкций буровых машин ударного действия к условиям эксплуатации // Горное оборудование и электромеханика. — 2017. — № 2. — С. 19–22.
11. Болобов В. И., Баталов А. П., Бинь Ле Тхань, Юсупов Г. А. Закономерности разрушения горной породы единичным ударом // Горное оборудование и электромеханика. — 2017. — № 6. — С. 43–48.
12. Хорешок А. А., Цехин А. М., Борисов А. Ю. Влияние условий эксплуатации горных комбайнов на конструкцию их исполнительных органов // Горное оборудование и электромеханика. — 2012. — № 6. — С. 2–5.
13. Evans I. A theory of the cutting force for point-attack picks // Geotechnical and Geological Engineering. 1984. Vol. 2. No 1. Pp. 63–71.
14. Kuidong G., Changlong D., Hongxiang J., Songyong L. A theoretical model for predicting the Peak Cutting Force of conical picks // Frattura ed Integrità Strutturale (Fracture and Structural Integrity). 2014. Vol. 8. No 27. Pp. 43–52. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.27.06.
15. Захаров В. Н., Линник Ю. Н., Линник В. Ю., Жабин А. Б. Классификация угольных пластов по особенностям геологического строения и разрушаемости // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 5. — С. 5–12. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-5-12.
16. Габов В. В., Нгуен Кхак Линь, Нгуен Ван Суан, Ле Тхань Бинь, Задков Д. А. Обоснование геометрических и режимных параметров шнековых исполнительных органов, обес-

печивающих эффективность погрузки угля на забойный конвейер // Уголь. — 2018. — № 2. — С. 32 — 33.

17. Хорешок А. А., Маметьев Л. Е., Цехин А. М., Борисов А. Ю. Горные машины и оборудование подземных горных работ. Режущий инструмент горных машин: учебное пособие. — Кемерово: КузГТУ, 2012. — 288 с.

18. Kuidong Gao, Changlong Du, Jianghui Dong, Qingliang Zeng Influence of the drum position parameters and the ranging arm thickness on the coal loading performance // Minerals. 2015. Vol. 5. Pp. 723 — 736. DOI: 10.3390/min5040520.

19. Zvonarev I. E., Shishlyannikov D. I. Efficiency improvement of loading of potassium ore by means of «Ural-20R» heading-and-winning machine // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 87. Article 022025.

20. Игнатьев А. Д., Карленков А. А., Лотарь В. Н. и др. Основы выбора параметров струговых установок для угольной промышленности. — М.: Наука, 1980. — 267 с. **ИТАС**

## REFERENCES

1. Pozin E. Z., Melamed V. Z., Ton V. V. *Razrushenie ugley vyemochnymi mashinami* [Coal crushing by excavating machines], Moscow, Nedra, 1984, 288 p.

2. Pozin E. Z., Melamed V. Z., Azovtseva S. M. *Izmel'chenie ugley pri rezanii* [Coal crushing while cutting], Moscow, Nauka, 1977, 138 p.

3. Linnik Yu. N., Linnik V. Yu. *Razrushenie ugol'nykh plastov ispolnitel'nymi organami kombaynov i strugov* [Destruction of coal seams by executive bodies of combines and plows], Moscow, Rusaync, 2020, 430 p.

4. 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.

5. Qiangling Yao, Xuehua Li, Boyang Sun, Minghe Ju, Qundi Qu Numerical investigation of the effects of coal seam dip angle on coal wall stability. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2017. Vol. 100. Pp. 298 — 309.

6. Adam K. Schwartzkopff, Nouné S. Melkoumian, Chaoshui Xu Fracture mechanics approximation to predict the breakdown pressure using the theory of critical distances. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2017. Vol. 95. Pp. 48 — 61.

7. Stoxreiter T., Martin A., Teza D., Galler R. Hard rock cutting with high pressure jets in various ambient pressure regimes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018. Vol. 108. Pp. 179 — 188.

8. OST 12.44.258-84. *Kombayny ochistnye. Vybor parametrov i rascheta sil rezaniya i podachi na ispolnitel'nykh organakh. Metodika* [Industry standard 12.44.258-84. Cleaning combines. Selection of parameters and calculation of cutting forces and feed on the executive bodies. Methodology], Moscow, 1985, 108 p.

9. Aksenov V. V., Khoreshok A. A., Anan'ev K. A., Ermakov A. N. Review and analysis of methods for determining the parameters of cutting executive bodies. *Energeticheskaya bezopasnost' Rossii. Novye podkhody k razvitiyu ugol'noy promyshlennosti. Sbornik trudov XVI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Energy Security of Russia. New approaches to the development of the coal industry. Proceedings of the XVI International Scientific and Practical Conference], Kemerovo, 2014, pp. 92 — 94. [In Russ].

10. Komissarov A. P., Prokopovich G. V., Glazyrin S. S. Adaptation of percussion drilling machine designs to operating conditions. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2017, no 2, pp. 19 — 22. [In Russ].

11. Bolobov V. I., Batalov A. P., Bin Le Tkhan, Yusupov G. A. Regularities of rock destruction by a single blow. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2017, no 6, pp. 43 — 48. [In Russ].

12. Khoreshok A. A., Tsekhin A. M., Borisov A. Yu. Influence of operating conditions of mining combines on the design of their executive bodies. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2012, no 6, pp. 2-5. [In Russ].

13. Evans I. A theory of the cutting force for point-attack picks. *Geotechnical and Geological Engineering*. 1984. Vol. 2. No 1. Pp. 63 – 71.

14. Kuidong G., Changlong D., Hongxiang J., Songyong L. A theoretical model for predicting the Peak Cutting Force of conical picks. *Frattura ed Integrità Strutturale (Fracture and Structural Integrity)*. 2014. Vol. 8. No 27. Pp. 43 – 52. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.27.06.

15. Zakharov V.N., Linnik Yu.N., Linnik V.Yu., Zhabin A. B. Classification of coal seams by features of geological structure and characteristics of breaking. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no 5, pp. 5 – 12. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-5-12.

16. Gabov V.V., Nguen Khak Lin, Nguen Van Suan, Le Tkhan Bin, Zadkov D.A. Substantiation of geometric and operating parameters of auger executive bodies, ensuring the efficiency of loading coal onto the face conveyor. *Ugol'*. 2018, no 2, pp. 32 – 33. [In Russ].

17. Khoreshok A.A., Mamet'ev L.E., Tsekhin A.M., Borisov A.Yu. *Gornye mashiny i oborudovanie podzemnykh gornykh rabot. Rezhushchiy instrument gornykh mashin: uchebnoe posobie* [Mining machines and equipment for underground mining. Mining Machine Cutting Tool. Educational aid], Kemerovo, KuzGTU, 2012, 288 p.

18. Kuidong Gao, Changlong Du, Jianghui Dong, Qingliang Zeng Influence of the drum position parameters and the ranging arm thickness on the coal loading performance. *Minerals*. 2015. Vol. 5. Pp. 723 – 736. DOI: 10.3390/min5040520.

19. Zvonarev I.E., Shishlyannikov D.I. Efficiency improvement of loading of potassium ore by means of «Ural-20R» heading-and-winning machine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 87. Article 022025.

20. Ignat'ev A.D., Karlenkov A.A., Lotar' V.N. *Osnovy vybora parametrov strugovykh ustanovok dlya ugol'noy promyshlennosti* [Plow Sizing Basics for the Coal Industry], Moscow, Nauka, 1980, 267 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Захаров Валерий Николаевич – чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор, Институт проблем комплексного освоения недр РАН,

Линник Юрий Николаевич<sup>1</sup> – д-р техн. наук, профессор,

Линник Владимир Юрьевич<sup>1</sup> – д-р экон. наук, доцент, профессор, e-mail: vy\_linnik@guu.ru,

Жабин Александр Борисович – д-р техн. наук, профессор, действительный член Академии горных наук, Тульский государственный университет,

Цих Алексей – д-р техн. наук, профессор, Фрайбургская академия, консультант в области энергоэффективности, MS QF GmbH, Одервиц, Германия.

<sup>1</sup> Государственный университет управления.

**Для контактов:** Линник В.Ю., e-mail: vy\_linnik@guu.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.N. Zakharov, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russia,

Yu.N. Linnik<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

V.Yu. Linnik<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Econ.), Assistant Professor, Professor, e-mail: vy\_linnik@guu.ru,

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

of Academy of Mining Sciences, Tula state University, 300012, Tula, Russia,

A. Zich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Freiburg Academy,

Consultant in the Field of Energy Efficiency, MS QF GmbH, Oderwitz, Germany,

<sup>1</sup> State University of Management, 109542, Moscow, Russia.

**Corresponding author:** V.Yu. Linnik, e-mail: vy\_linnik@guu.ru.

Получена редакцией 03.11.2020; получена после рецензии 16.12.2020; принята к печати 10.02.2021.

Received by the editors 03.11.2020; received after the review 16.12.2020; accepted for printing 10.02.2021.