

УДК 622.33.013.3

**ОПТИМИЗАЦИЯ ШИРИНЫ ЗАХВАТА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ  
ШНЕКОВОГО КОМБАЙНА ПРИ ОТРАБОТКЕ ПОЛОГОГО УГОЛЬНОГО  
ПЛАСТА ДЛИННЫМ ОЧИСТНЫМ ЗАБОЕМ**

**А. А. Ордин, А. М. Никольский**

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: [ordin@misd.ru](mailto:ordin@misd.ru),  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Изложена постановка и решение задачи оптимизации ширины захвата очистного шнекового комбайна по условию максимума его производительности с учетом физико-механических свойств пласта и фракционного состава отбитого угля. Для расчета скорости подачи и производительности комбайна в зависимости от ширины захвата предложено использовать значения напряжений среза и смятия пласта вместо сопротивляемости пород резанию. Установлено, что для повышения сортности угля и снижения метановыделения в очистном забое, а также для равномерного распределения нагрузок на резцы комбайна их следует устанавливать на лопастях шнека неравномерно, по экспоненциальной зависимости.

*Шахта, очистной комбайн, шнек, ширина захвата, оптимизация, производительность, скорость подачи, частота вращения, тангенциальные резцы, фракционный состав угля*

DOI: 10.15372/FTPRPI20180110

В 2017 г. добыча угля в Кузбассе достигла 241 млн т, при этом подземным способом получено 84 млн т, из которых более 90 % добывается на пологих угольных пластах длинностолбовой системой разработки с выемкой угля шнековыми очистными комбайнами.

Современные тенденции механизации очистных работ на шахтах заключаются в постоянном увеличении ширины захвата и, соответственно, производительности и мощности шнековых комбайнов. Если первые узкозахватные очистные комбайны выпускались с шириной захвата 0.63 м, то сейчас ширина захвата комбайнов, например SL-500/1, SL-1000, увеличилась до 1.2 м. Скорость подачи таких комбайнов может достигать 40 м/мин, а суммарная мощность приводов резания и подачи превышает 3 000 кВт [1].

При проектировании шахт теоретическая производительность очистного комбайна при длинностолбовой системе разработки определяется по формуле [2–5]:

$$A = \gamma m r v_{\text{п}}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  — плотность угля, т/м<sup>3</sup>;  $m$  — вынимаемая мощность пласта, м;  $r$  — ширина захвата очистного комбайна, м;  $v_{\text{п}}$  — скорость подачи очистного комбайна, м/мин.

Из формулы (1) следует, что теоретическая производительность очистного комбайна прямо пропорциональна ширине захвата, что, собственно, и объясняет практику увеличения этого параметра.

Однако 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. При широкозахватной выемке увеличивается площадь незакрепленной части кровли пласта, что служит причиной вывала породы в очистной забой. При выемке и погрузке угля шнеками комбайна на скребковый конвейер происходит переизмельчение угольной массы, что приводит к повышению метановыделения в очистном забое и снижению оптовой цены угля из-за низкой его сортности. При увеличении дебита метана из мелкодисперсной угольной массы производительность длинных очистных забоев на многих шахтах Кузбасса сдерживается газовым фактором [6, 7].

Кроме того, линейная зависимость (1) теоретической производительности очистного комбайна от ширины захвата не совсем корректна, так как в ней скорость подачи очистного комбайна зависит от мощности привода и сопротивляемости пласта резанию, но не зависит от ширины захвата [5, 6]:

$$v_{\text{п}} = \frac{30 N \eta n_{1\text{л}}}{fP \cos \alpha \pm P \sin \alpha + S_{\text{ср}} D n_3 K_{\text{от}} K_{\Sigma}}, \quad (2)$$

где  $N$  — мощность электродвигателей комбайна, кВт;  $\eta$  — КПД редуктора привода подачи;  $n_{1\text{л}}$  — количество резцов в одной линии резания (принимается в зависимости от конструкции шнека);  $P$  — вес комбайна, кН;  $f$  — коэффициент трения скольжения между комбайном и скребковым конвейером;  $\alpha$  — угол падения пласта, град;  $n_3$  — количество резцов, разрушающих забой одновременно (для большинства очистных комбайнов в работе обычно участвует половина всех резцов на шнеке);  $S_{\text{ср}}$  — средневзвешенная сопротивляемость пласта угля резанию, кН/м;  $D$  — диаметр шнека, м;  $K_{\text{от}}$  — коэффициент отжима, учитывающий уменьшение сил резания вблизи груди забоя и, соответственно, увеличение сил сопротивления резанию в кутковой части забоя;  $K_{\Sigma} = K_{\alpha} K_b K_{з.р} K_{\phi.р}$  — коэффициенты, учитывающие угол резания, ширину реза, затупление и форму резцов.

Недостаток формулы (2) заключается в отсутствии в ней ширины захвата комбайна. Между тем влияние этого фактора на скорость подачи комбайна очевидно, так как при неизменной мощности привода подачи комбайна увеличение его ширины захвата приводит к возрастанию реакции сопротивления пласта и уменьшению скорости подачи.

Отсутствие ширины захвата в (2) связано с одномерной постановкой задачи и, в частности, с использованием линейной функции — сопротивляемости пласта резанию. В упрощенной постановке задачи сила сопротивления пласта резанию определяется умножением сопротивляемости угля на диаметр шнека.

Более адекватной, на наш взгляд, является двумерная плоская постановка задачи, где в качестве второго геометрического параметра выступает ширина захвата комбайна. В этой постановке необходимо перейти от сопротивляемости пласта резанию к деформациям среза и смятия пласта, для чего используются соответствующие касательные и нормальные напряжения:

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{F_{\text{ср}}}{S_{\text{ср}}} = \frac{2F_{\text{ср}}}{\pi D r}, \quad \sigma_{\text{см}} = \frac{F_{\text{п}}}{S_{\text{см}}} = \frac{4F_{\text{п}}}{n_3 \pi d_p^2}, \quad (3)$$

где  $F_{\text{п}}$ ,  $F_{\text{ср}}$  — соответственно усилие подачи при поступательном движении комбайна и окружная сила среза, создаваемая резцами при вращении шнека, Н;  $\sigma_{\text{см}}$ ,  $\tau_{\text{ср}}$  — нормальное и касательное напряжения, возникающие соответственно при смятии и срезе пласта шнеками

комбайна, Па;  $S_{см}$  — площадь смятия пласта резцами диаметром  $d_p$ , м<sup>2</sup>;  $S_{ср}$  — площадь серповидного среза, определяемая в зависимости от диаметра шнека и ширины захвата комбайна, м<sup>2</sup> (рис. 1).

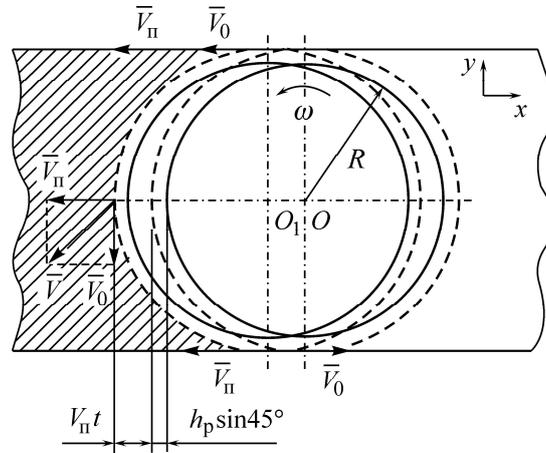


Рис. 1. Форма серповидного среза пласта резцом шнекового комбайна и векторная сумма скоростей подачи и резания

Сила подачи обеспечивает равномерное движение очистного комбайна вдоль скребкового конвейера, преодолевая силу трения скольжения, составляющую веса комбайна, зависящую от угла падения пласта, и реакцию сопротивления пласта резанию. Резцы на шнеке комбайна участвуют в поступательном движении комбайна вдоль лавы и вращательном движении шнека. Процесс резания состоит из деформации среза пласта резцами при вращении шнека и деформации смятия пласта при поступательном движении резцов.

Таким образом, реакция сопротивления пласта резанию — это векторная сумма сил при деформациях среза и смятия пласта:

$$\bar{F}_p = \bar{F}_п + \bar{F}_{ср}, \quad (4)$$

которая вследствие поступательного и вращательного движения резцов изменяется от максимума до минимума (рис. 1).

Максимальная сила среза и смятия пласта возникает в верхней части шнека при его вращении, как показано на рис. 1, и равна

$$F_{p\max} = F_п + F_{ср} = \frac{N_п \eta}{v_п} + \frac{2M_{шi}}{D} = \frac{N_п \eta}{v_п} + \frac{60N_ш \eta}{D\pi n_ш}, \quad (5)$$

где  $N_п$ ,  $N_ш$  — мощности приводов соответственно подачи и вращения шнеков, кВт;  $M_ш$  — вращающий момент на шнеке, Нм;  $n_ш$  — частота вращения шнека, об/мин.

При резании угля комбайном должно выполняться условие, при котором происходит разрушение пласта на срез и смятие:

$$F_{p\max} = \frac{N_п \eta}{v_п} + \frac{60N_ш \eta}{D\pi n_ш} \geq ([\tau_{ср}] S_{ср} + [\sigma_{см}] S_{см}), \quad (6)$$

где  $[\tau_{ср}]$  — предел прочности угля на срез;  $[\sigma_{см}]$  — предел прочности угля на смятие.

Отсюда находится необходимая скорость подачи комбайна:

$$v_п = \frac{N_п \eta}{fP \cos \alpha \pm P \sin \alpha + \left( 0.5[\tau_{ср}] \pi D r + [\sigma_{см}] S_{см} - \frac{60N_ш \eta}{D\pi n_ш} \right) K_{от} K_{\Sigma}}. \quad (7)$$

Деформация среза осуществляется в основном приводом, вращающим шнек, а деформация смятия — приводом подачи комбайна.

Для уравнивания вращающих моментов верхний и нижний шнеки очистного комбайна всегда вращаются в противоположные стороны. Модуль результирующей силы (5) изменяется от максимума в верхней части шнека, где силы складываются, до минимума — в нижней части, где силы вычитаются, при вращении шнека по направлению движения комбайна. Соответственно при изменении направления вращения шнека максимальное значение силы сопротивления забоя возникает в нижней части шнека.

Коэффициент отжима, входящий в (2), зависит от ширины захвата комбайна [3, 5]:

$$K_{от} = K_0 + \frac{r - k_1 m}{r + k_2 m}, \quad (8)$$

где  $K_0$  — коэффициент отжима на поверхности забоя:  $K_0 = 0.35$  для углей марок К, Ж, ОС, Т, А,  $K_0 = 0.45$  для марок Г, Д;  $k_1 = 0.1$ ,  $k_2 = 1$  [3];  $r$  — ширина захвата исполнительного органа комбайна, м;  $m$  — вынимаемая мощность пласта (по угольным пачкам), м. Для вязких, хрупких и весьма хрупких углей коэффициенты  $K_0$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  принимаются по [3, 6–8]. Как следует из рис. 2, зависимости (8) коэффициента отжима от ширины захвата комбайна являются возрастающими, близкими к линейным.

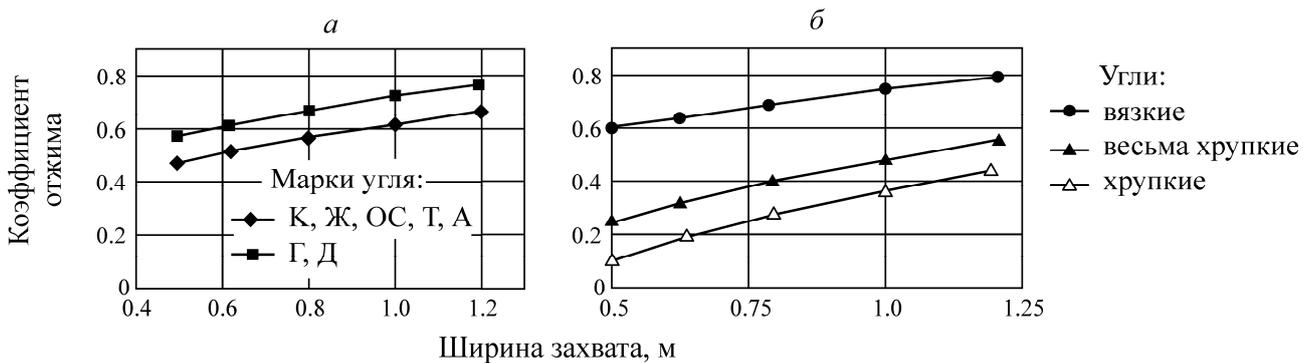


Рис. 2. Зависимости коэффициента отжима от ширины захвата комбайна, марок (а) и хрупкости (б) углей

Таким образом, скорость подачи (2) шнекового комбайна с учетом формул (6)–(8) определяется по зависимости, обратно пропорциональной его ширине захвата:

$$v_{п}(r) = \frac{15 N_{п} \eta n_{1л}}{f P \cos \alpha \pm P \sin \alpha + \frac{\pi d_p r}{b \cos \beta} \left( 0.25 [\sigma_{см}] d_p + 0.5 [\tau_{ср}] D - \frac{60 N_{ш} \eta}{D \pi n_{ш}} \right) \left( K_0 + \frac{r - k_1 m}{r + k_2 m} \right) n_3 K_{\Sigma}}. \quad (9)$$

Подставляя (9) в (1), получаем зависимость теоретической производительности очистного комбайна от ширины его захвата:

$$A(r) = \frac{15 \gamma m N_{п} \eta n_{1л}}{\frac{1}{r} (f P \cos \alpha \pm P \sin \alpha) + \frac{\pi d_p K_{\Sigma}}{b \cos \beta} \left( 0.25 [\sigma_{см}] d_p + 0.5 [\tau_{ср}] D - \frac{60 N_{ш} \eta}{D \pi n_{ш}} \right) \left( K_0 + \frac{r - k_1 m}{r + k_2 m} \right)}. \quad (10)$$

Как видно, знаменатель формулы (10) представляет собой сумму убывающей и возрастающей зависимостей от ширины захвата, имеющей точку минимума. Следовательно, теоретическая производительность очистного комбайна имеет точку максимума относительно ширины захвата.

На рис. 3 приведены расчетные зависимости (9), (10) скорости подачи и теоретической производительности очистного комбайна SL-500/1 от ширины захвата при отработке пласта мощностью 3.0 м. Технические характеристики комбайна SL-500/1: диапазон вынимаемой мощности пласта — 2.0–5.0 м; допустимый угол падения пласта — 35°; суммарная мощность электродвигателей — 948 кВт; мощность привода резания — 700 кВт; мощность привода подачи — 108 кВт; диаметр шнека — 1.6 м; максимальная скорость подачи — 28.0 м/мин; диапазон ширины захвата — 0.85–1.0 м; максимальное тяговое усилие — 1000 кН; вес комбайна — 550 кН; частота вращения шнека — 23, 29, 34 мин<sup>-1</sup>; вращающий момент при соответствующей частоте вращения шнека — 145, 115, 98 кНм [8–10].

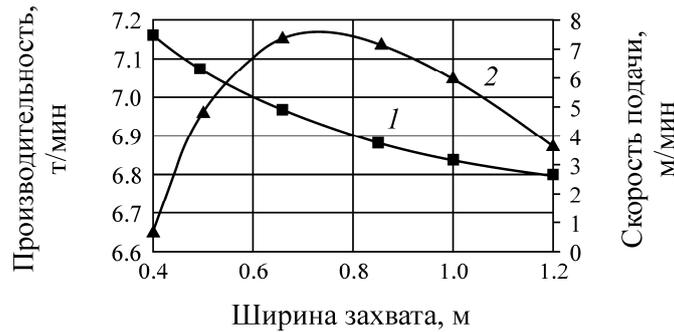


Рис. 3. Зависимости скорости подачи (1) и производительности (2) очистного комбайна SL-500/1 от ширины захвата

Максимальная производительность очистного комбайна достигается при ширине захвата 0.67 и 0.85 м и снижается при дальнейшем ее увеличении. В свою очередь скорость подачи очистного комбайна непосредственно связана с толщиной стружки [5]:  $v_{\text{п}} = h_{\text{м}} \pi n n_{1\text{л}}$ , где  $h_{\text{м}}$  — максимальная толщина стружки серповидного среза при повороте шнека на 90° (рис. 1);  $n$  — частота вращения шнека, мин<sup>-1</sup>.

Уменьшение ширины захвата очистного комбайна позволяет увеличить скорость его подачи, от которой существенно зависит фракционный состав отбитого угля и, соответственно, метановыделение в очистном забое.

Средняя толщина стружки этого среза определяется по формуле [5]:

$$h_{\text{ср}} = \frac{2h_{\text{м}}}{\pi} = \frac{2v_{\text{п}}}{\pi n n_{1\text{л}}}. \quad (11)$$

Определим диаметр куска отбитого угля как среднее арифметическое между толщиной стружки и расстоянием между резцами на лопастях шнека:

$$d_{\text{ср}} = 0.5(h_{\text{ср}} + b) = \frac{v_{\text{п}}}{\pi n n_{1\text{л}}} + 0.5b. \quad (12)$$

Как видно из (12), средний диаметр отбитого куска угля прямо пропорционален скорости подачи очистного комбайна и обратно пропорционален частоте вращения шнека (рис. 4).

Подставляя (7) в формулу (12), получаем нелинейную зависимость среднего диаметра куска угля от ширины захвата комбайна:

$$d_{\text{ср}}(r) = \frac{15N\eta}{\pi n \left( fP \cos \alpha \pm P \sin \alpha + \frac{\sigma_{\text{см}} r \pi d_{\text{п}}^2}{4b \cos \beta} \left( K_0 + \frac{r - k_1 m}{r + k_2 m} \right) \right)} + 0.5b. \quad (13)$$

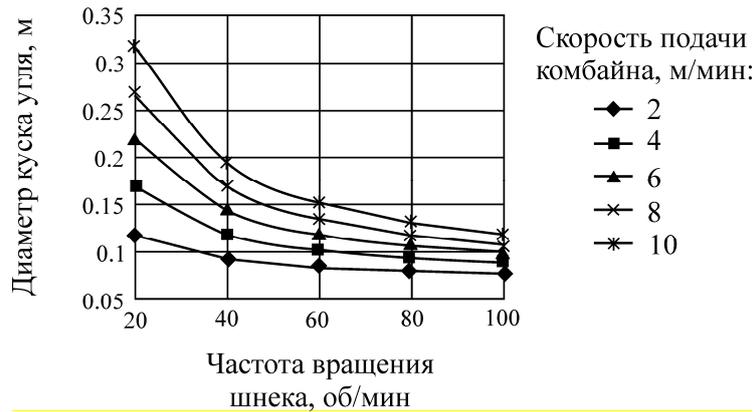


Рис. 4. Зависимость среднего диаметра куска угля от частоты вращения шнека и скорости подачи очистного комбайна

Видно, что с увеличением ширины захвата при одной и той же мощности привода средний диаметр куска угля уменьшается по гиперболической зависимости вследствие снижения скорости подачи, т. е. происходит переизмельчение отбитого угля. В свою очередь это приводит к увеличению метановыделения в очистном забое и снижению оптовой цены угля за счет повышения его сортности.

Тангенциальные резцы, расположенные на лопастях шнека очистного комбайна, подвергаются неравномерным нагрузкам и износу. Поскольку коэффициент отжима (8) возрастает с увеличением ширины захвата, максимальные нагрузки на тангенциальные резцы достигаются в кутковой части шнека, а минимальные — вблизи груди забоя. Необходимое усилие для серповидного среза части пласта шириной  $\delta$ , равной расстоянию между резцами на лопасти шнека, определяется по формуле

$$F_{cp}(r) = 0.5\tau_{cp}\pi D\delta K_o(r) = 0.5\tau_{cp}\pi D\delta \left( K_o + \frac{r - k_1 m}{r + k_2 m} \right), \quad (14)$$

и, учитывая зависимости, представленные на рис. 2, практически линейно растет с увеличением ширины захвата. Также линейно с удалением от груди забоя вглубь пласта возрастает и фактическое касательное напряжение среза:

$$\tau = \tau_{cp} K_o(r) = \tau_{cp} \left( K_o + \frac{r - k_1 m}{r + k_2 m} \right). \quad (15)$$

Срез пласта обеспечивается вращающим моментом  $M$  шнека при условии, что окружная сила шнека превосходит необходимое усилие среза:

$$F_o = \frac{M}{0.5D} = \frac{60N_p}{\pi D n} \geq 0.5\tau_{cp}\pi D\delta \left( K_o + \frac{r - k_1 m}{r + k_2 m} \right), \quad (16)$$

где  $M$  — вращающий момент на шнеке, кНм;  $N_p$  — мощность электродвигателя привода резания, кВт.

Из (14) следует, что вследствие неравномерности распределения касательных напряжений тангенциальные резцы следует размещать на лопастях шнека также неравномерно с меньшим интервалом вблизи кутковой части и с увеличением расстояния между резцами вблизи груди забоя. Такое расположение резцов на лопасти шнека позволит выровнять нагрузку на резцы и обеспечить увеличение крупности отбитого угля.

В таблице и на рис. 5 приводятся результаты расчетов по рациональному расположению резцов на лопасти шнека и выравниванию нагрузки на резцы для очистного комбайна SL-500/1.

Результаты расчета расстояний между тангенциальными резцами очистного комбайна SL-500/1

Ширина захвата $r$ , м	0.2	0.4	0.5	0.63	0.8	1.0	1.2
Коэффициент отжима для марок угля К, Ж, ОС, Т, А	0.35	0.43	0.47	0.51	0.56	0.62	0.66
Коэффициент отжима для марок угля Г, Д	0.45	0.53	0.57	0.61	0.66	0.72	0.76
Предел прочности на срез, МПа	0.32	0.39	0.42	0.46	0.51	0.56	0.60
Расстояние между резцами для марок угля К, Ж, ОС, Т, см	14.29	11.54	10.64	9.74	8.86	8.11	7.55
Усилие среза, кН	141.3	141.3	141.3	141.3	141.3	141.3	141.3
Предел прочности на срез, МПа	0.41	0.48	0.51	0.55	0.60	0.65	0.69
Расстояние между резцами для марок угля Г, Д, см	11.11	9.38	8.77	8.15	7.53	6.98	6.56

Как видно из таблицы, расстояние между резцами зависит от касательных напряжений среза и марок угля. Для марок угля К, Ж, ОС, Т расстояние между резцами следует располагать на лопасти шнека неравномерно, уменьшая от 14 см вблизи груди забоя до 7.5 см вблизи кутковой части. Для марок угля Г и Д расстояние между резцами следует уменьшать соответственно с 11 до 6.5 см. Увеличение плотности расстановки резцов для этих марок вызвано повышением вязкости угля.

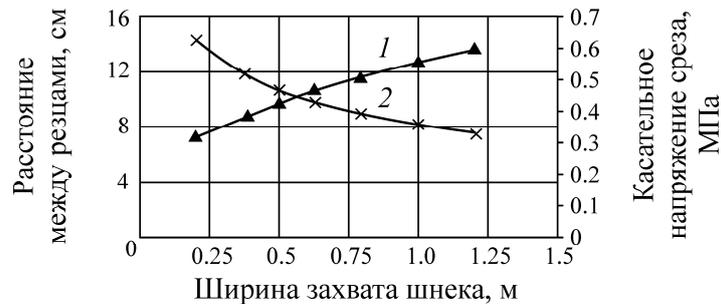


Рис. 5. Зависимости касательных напряжений пласта на срез (1) и расстояния между резцами (2) для марок угля К, Ж, ОС, Т на лопасти шнека от ширины захвата комбайна SL-500/1

Полученные результаты изменения расстояния между резцами от длины  $x$  лопасти шнека аппроксимируются нелинейными зависимостями:

— для марок угля К, Ж, ОС, Т:

$$\delta(x) = 25.86 - 3.88 \ln(x), \quad R^2 = 0.984; \quad (17)$$

$$\delta(x) = 43.4x^{-0.36}, \quad R^2 = 0.964;$$

— для марок угля Г, Д:

$$\delta(x) = 20.1 - 2.83 \ln(x), \quad R^2 = 0.98; \quad (18)$$

$$\delta(x) = 29.05x^{-0.3}, \quad R^2 = 0.98.$$

При такой расстановке резцов, как видно из таблицы, на протяжении всей ширины шнека обеспечивается равномерное распределение нагрузки на резцы 141 кН. Условие (16) для среза пласта обеспечивается вращающим моментом шнека 145 кНм при его вращении с частотой 23 мин<sup>-1</sup>, так как окружная сила при диаметре шнека 2 м в этом случае составляет 145 кН.

## ВЫВОДЫ

Современная тенденция увеличения ширины захвата очистного комбайна при длинностолбовой системе разработки угольных пластов обеспечивает рост производительности очистных забоев, но имеет и негативные стороны. Резание пласта в кутковой части забоя осуществляется

вне зоны отжима, т. е. в области с повышенным сопротивлением пласта резанию. При широкозахватной выемке увеличивается площадь незакрепленной части кровли пласта, что приводит к вывалам породы в очистной забой. При выемке и погрузке угля шнеками комбайна на скребковый конвейер происходит переизмельчение угольной массы, что обуславливает повышение метановыделения в очистном забое и снижение оптовой цены угля из-за низкой его сортности. Из-за увеличения дебита метана из мелкодисперсной угольной массы производительность длинных очистных забоев на многих шахтах Кузбасса сдерживается газовым фактором.

Существующие в практике проектирования шахт зависимости производительности и скорости подачи очистного комбайна от ширины его захвата не являются корректными, так как не учитывают изменение коэффициента отжима угля и динамику нормальных и касательных напряжений пласта вблизи груди забоя. Учет этих факторов позволил установить обратно пропорциональную зависимость скорости подачи и экстремальную зависимость производительности очистного комбайна от ширины захвата.

Изменение коэффициента отжима угля от ширины захвата приводит к росту касательных напряжений на срез и неравномерности нагрузок на резцы комбайна. Вследствие этого тангенциальные резцы следует размещать на лопастях шнека неравномерно, с меньшим интервалом вблизи кутковой части и с увеличением расстояния между резцами вблизи груди забоя. Такое расположение резцов на лопасти шнека позволит выровнять нагрузку на резцы и обеспечить увеличение крупности отбитого угля. Результаты расчета касательных напряжений пласта на срез установили для очистного комбайна SL-500/1 убывающие нелинейные зависимости расстояний между резцами на лопастях шнека для различных марок угля.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демура В. Н., Артемьев В. В., Ясюченя С. В. и др. Технологические схемы подготовки и отработки выемочных участков на шахтах ОАО «СУЭК-Кузбасс». Т. 3. Подземные горные работы. — М., 2014. — 240 с.
2. Липкович С. М. Основы проектирования угольных шахт. — М.: Недра, 1967. — 223 с.
3. Солод В. И., Гетопанов В. Н., Рачек В. М. Проектирование и конструирование горных машин и комплексов. — М.: Недра, 1982. — 350 с.
4. Малеев Г. В., Гуляев В. Г., Бойко Н. Г. и др. Проектирование и конструирование горных машин и комплексов. — 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. Ордин А. А., Метельков А. А. К вопросу об оптимизации длины и производительности комплексномеханизированного очистного забоя угольной шахты // ФТПРПИ. — 2013. — № 2. — С. 100–113.
7. Ордин А. А., Тимошенко А. М. О влиянии фракционного состава угля на метановыделение в очистном забое // ФТПРПИ. — 2016. — № 3. — С. 104–110.
8. Морозов В. И., Чуденков В. И., Сурина Н. В. Очистные комбайны: справочник. — М.: МГУ, 2006. — 650 с.
9. Хорешок А. А., Антонов Ю. А., Кожухов Л. Ф. и др. Горные машины и оборудование подземных горных работ. — Кемерово: КузГТУ, 2012. — 125 с.
10. Комбайны очистные. Основные параметры и размеры: ГОСТ 28600-90. — М.: Госкомитет по управлению качеством продукции и стандартам, 1990.

*Поступила в редакцию 11/ХII 2017*