

О.Е. Шабаев /д.т.н./, В.Г. Нечепаев /д.т.н./, П.П. Зинченко
 ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ОЧИСТНЫХ КОМБАЙНОВ СО ШНЕКАМИ МАЛЫХ ДИАМЕТРОВ

Предложены метод и математическая модель оптимизации структуры и параметров очистных комбайнов для выемки тонких пологих пластов по комплексному критерию качества (техническая производительность, мощность электродвигателя привода исполнительного органа, удельные энергозатраты разрушения и погрузки горной массы). Установлено, что максимальная техническая производительность при допустимом уровне энергоемкости достигается в случае одновременного соблюдения следующих условий: скорость перемещения – граничная (максимальная) по условию отсутствия циркуляции в рабочем пространстве шнека; диаметр шнека – ближайший из стандартного ряда к средней мощности пласта; ширина захвата – наименьшая из стандартного ряда.

Ключевые слова: математическая модель оптимизации, шнек малого диаметра, техническая производительность, удельные энергозатраты, рациональные параметры комбайна.

Постановка проблемы

Значительные запасы каменного угля в Донбассе являются основным сырьевым источником экономического развития региона. При этом горно-геологические условия залегания угольных пластов весьма сложные – большая глубина залегания (1050...1500) м; 83,2 % всех угольных пластов имеют малую геологическую мощность 0,55...1,20 м [1], из которых наиболее распространены пласты со средней мощностью 0,82 м...0,89 м.

Добыча угля из тонких пологих пластов осуществляется преимущественно узкозахватными комбайнами со шнековыми исполнительными органами в составе механизированных комплексов. Однако недостаточная погрузочная способность шнеков малых диаметров ограничивает рабочую скорость перемещения комбайна на уровне 1...3 м/мин [2,3] и, как следствие, обуславливает снижение технической производительности комплекса и увеличение энергоемкости процессов разрушения и погрузки горной массы. Повышение эффективности работы очистных комбайнов может быть достигнуто путем оптимизации их структуры и параметров применительно к конкретным заданным горно-геологическим условиям эксплуатации, что требует соответствующего теоретического обоснования на основе математического моделирования.

Анализ последних исследований и публикаций

Вопросам оптимизации параметров очист-

ных комбайнов со шнеками малых диаметров, по критерию максимальной технической производительности и минимальной энергоемкости их работы в заданных горно-геологических условиях посвящено множество исследований отечественных и зарубежных ученых [2...11]. В работах [2...4] впервые изложены рекомендации и методики, касающиеся выбора оптимальных параметров дополнительных «активирующих» [2] устройств, а также рациональных значений углов наклона лопастей и частот вращения шнеков малых диаметров. Общие принципы конструирования горных машин, а также основы обеспечения оптимальных режимов работы изложены в работах [5...7]. Исследования [8...12] показали, что увеличение технической производительности и снижение энергоемкости процессов разрушения и погрузки горной массы достигается при работе комбайнов без дополнительных погрузочных устройств, при условии обеспечения рациональной ширины захвата шнека. При этом необходимым условием является обеспечение комплексного подхода для определения рациональной структуры, режимных и конструктивных параметров комбайнов для тонких пологих пластов, обеспечивающих рациональные значения их макроуровневых параметров.

Цель (задачи) исследования

Обоснование рациональных структуры и параметров очистных комбайнов для тонких пологих пластов, обеспечивающих максимальную техническую производительность при удовле-

творительной энергоемкости процессов разрушения и погрузки горной массы.

Основной материал исследования

Математическая модель оптимизации параметров очистных комбайнов

Установление параметров очистных комбайнов, обеспечивающих наибольшее значение их количественных показателей при работе в заданных горно-геологических условиях, является оптимизационной задачей, решение которой требует задания и обоснования целевой функции, переменных проектирования, ограничений на их значения, а также постоянных проектирования [13, 14].

Для достижения поставленных в работе целей задача оптимизации решалась методом свертывания частных критериев в комплексный критерий качества [14]. В формализованном виде математическую модель оптимизации параметров очистных комбайнов в данном случае можно представить в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Найти } \bar{X}_n^{opt} \ (n = 1, N_n) \ \text{при которых:} \\ T = \sum_{j=1}^{N_j} \Delta_j(\bar{X}_n, \bar{C}) \cdot c_j \rightarrow \max \\ \bar{X} \in R_x^n, \bar{C} \\ R_x^n \supset \bar{X} \left\{ \begin{array}{l} g_i(\bar{X}, \bar{C}) \leq 0, \quad i = \overline{1, N_i} \\ X_k^{\min} \leq X_k \leq X_k^{\max}, \quad k = \overline{1, N_k} \end{array} \right. \end{array} \right. ,$$

где \bar{X}_n^{opt} – n -е оптимальное значение вектора параметров; N_n – число оптимальных решений; T – комплексный критерий качества; $\Delta_j(\bar{X}_n, \bar{C})$ – j -й нормализованный частный показатель качества машины; c_j – коэффициент весомости j -го частного показателя качества ($\sum_{j=1}^{N_j} c_j = 1$); N_j – число частных критериев качества; \bar{X} – вектор переменных проектирования – параметров, оптимальные значения которых должны быть найдены в процессе оптимизации; \bar{C} – вектор постоянных проектирования, значения составляющих которого не меняются в процессе оптимизации; R_x^n – пространство проектирования, представляющее собой множество возможных (с учетом ограничивающих факторов) значений вектора переменных проектирования, из которых необходимо выбрать оптимальные значения. Это пространство задается в виде функций ограничения $g(\bar{X}, \bar{C})$, количество ко-

торых определяется факторами, ограничивающими возможные значения параметров проектирования; X_k^{\min} , X_k^{\max} – минимальное и максимальное возможные значения k -й составляющей вектора переменных проектирования; N_k – число ограниченных компонентов вектора \bar{X} .

Нормализуем частные показатели качества, т. е. приведем их к безразмерным величинам:

$$\Delta_j(\bar{X}_n, \bar{C}) = \frac{t_j(\bar{X}_n, \bar{C}) - t_j^{\min}}{t_j^{\max} - t_j^{\min}},$$

где $t_j(\bar{X}_n, \bar{C})$ – текущее значение j -го частного показателя качества; t_j^{\max} , t_j^{\min} – соответственно максимальное и минимальное значение j -го частного показателя качества.

Основными макроуровневыми параметрами, характеризующими эффективность работы очистных комбайнов и входящими в комплексный критерий качества T , являются техническая производительность, мощность и удельные энергозатраты разрушения и погрузки горной массы.

Техническая производительность комбайна

$$Q_{\text{тех}} = 60 \cdot \bar{H}_{\text{пл.}} \cdot B_3 \cdot V_{\text{п}} \cdot \rho \cdot k_{\text{тех}}, \ \text{т/час},$$

где $\bar{H}_{\text{пл.}}$ – средняя мощность пласта, м; B_3 – ширина захвата шнекового исполнительного органа, м; $V_{\text{п}}$ – скорость перемещения комбайна, м/мин; ρ – плотность угля в целике, т/м³; $k_{\text{тех}}$ – коэффициент, характеризующий степень технического совершенства очистного комбайна в составе механизированного комплекса [1, 7]:

$$k_{\text{тех}} = \frac{1}{\frac{1}{k_{\text{г}}} + \frac{t_{\text{м.о.}} + t_{\text{к.о.}} + t_{\text{з.н.}} \cdot V_{\text{п}}}{L_{\text{п}}}},$$

где $k_{\text{г}}$ – коэффициент готовности очистного комбайна; $t_{\text{м.о.}}$, $t_{\text{к.о.}}$, $t_{\text{з.н.}}$ – затраты времени на маневровые и концевые операции, а также на замену изношенного режущего инструмента соответственно, мин; $L_{\text{п}}$ – длина очистного забоя, м.

Компоновочная схема современных очистных комбайнов для тонких и весьма тонких пологих пластов предполагает размещение корпуса с забойной стороны конвейера в уступе забоя. Для того чтобы вписать вынесенный корпус комбайна в рабочее пространство, опережающий шнековый

исполнительный орган располагается у почвы пласта и выполняет основные технологические операции – разрушение и погрузку разрушенной горной массы, и вследствие этого является наиболее нагруженным. Отстающий шнек разрушает оставшуюся пачку угля у кровли пласта, а погрузку разрушенной горной массы практически не осуществляет. Мощность на разрушение и погрузку горной массы можно определить, используя разработанную ранее имитационную модель функционирования очистных комбайнов в условиях тонких пологих пластов [15].

Удельные энергозатраты разрушения и погрузки разрушенной горной массы очистным комбайном, как известно [1], составляют:

$$W_{ок} = \frac{P_{ок}}{60 \cdot \bar{H}_{пл.} \cdot B_3 \cdot V_{п.} \cdot \rho}, \text{ кВт} \cdot \text{ч/т},$$

где $P_{ок}$ – мощность на разрушение и погрузку горной массы очистным комбайном, кВт.

Рассмотрим вектор переменных проектирования, значения которых обуславливаются горно-геологическими и горнотехническими условиями эксплуатации очистного комбайна в составе механизированного комплекса, компоновкой и схемой работы выемочной машины, конструктивными элементами механизированного комплекса, участвующими в процессе погрузки и др., и которые подлежат определению в процессе оптимизации.

Компонентами вектора переменных проектирования являются:

– $\bar{X}_{ю} (D_{ю}, d_{ст}, B_3, B_d, \delta_d, \alpha_d^{ст}, \bar{P}_{сх.н})$ – вектор параметров исполнительного органа;

– $\bar{X}_{п.рез} (d_k)$ – вектор геометрических параметров редуктора привода резания;

– $\bar{X}_{к.сх} (S_{зав})$ – вектор параметров, обусловленных наличием дополнительных погрузочных устройств;

– $\bar{X}_k (H_k)$ – вектор параметров составляющих механизированного комплекса;

– $\bar{X}_{реж} (n_{об}, V_{п.})$ – вектор режимных параметров работы комбайна.

При выборе диаметра шнека по резцам $D_{ю}$ необходимо стремиться к обеспечению максимальной погрузочной способности опережающего шнека при рациональных значениях удельных энергозатрат на отстающем исполнительном органе [7]. Тогда диапазон изменения значений диаметра исполнительного органа находится в пределах: $0,54 \cdot \bar{H}_{пл.} < D_{ю} \leq \bar{H}_{пл.}$. Расчетные значения диаметров, попадающие в этот диапазон,

согласуются с ближайшими значениями из стандартного ряда, регламентированного ГОСТ [16].

Диаметр ступицы шнека $d_{ст}$, согласно [17], можно определить по зависимости:

$$d_{ст} = 0,4 \cdot \sqrt{D_{ю}}, \text{ м.}$$

Ширина захвата шнека B_3 , согласно исследованиям [8...11], оказывает значительное влияние на производительность и энергоемкость работы очистного комбайна, а ее значение находится в диапазоне 0,5...0,9 м.

Ширина отрезного диска B_d и толщина погрузочной лопасти δ_d обуславливается их прочностными характеристиками и геометрическими размерами устанавливаемых резцедержателей. Исходя из соображений повышения рабочего объема шнека, в котором будет размещаться разрушенная и транспортируемая горная масса, толщину отрезного диска и лопасти шнека необходимо выбирать минимальной по условию монтажа (при помощи сварки) резцедержателей на отрезном диске и лопасти шнека, а также по условию прочности последних.

Угол наклона лопасти шнека $\alpha_d^{ст}$ в значительной мере обуславливает погрузочную способность последнего как погрузочного органа очистного комбайна. Его оптимальное значение, согласно исследованиям [3, 4, 7], можно определить по зависимости:

$$\alpha_d^{ст} = 0,25 \cdot \pi - 0,50 \cdot \mu_{п.р.}, \text{ рад},$$

где $\mu_{п.р.}$ – приведенный угол трения выгружаемой горной массы на рабочей стороне шнека в зоне его разгрузочного торца.

Вектор параметров схемы набора $\bar{P}_{сх.н}$ резцового режущего инструмента устанавливается согласно методике [17] применительно к конкретным горно-геологическим условиям эксплуатации очистного комбайна.

На основе анализа ряда отечественных и зарубежных комбайнов, эксплуатируемых в условиях тонких пологонаклонных пластов, получена зависимость, позволяющая определить значение диаметра рукоятки качалки d_k в зоне разгрузочного торца шнека исходя из условия обеспечения заданной прочности элементов трансмиссии:

$$d_k = 0,072 \cdot \sqrt[3]{P_{ю}} + 0,080, \text{ м},$$

где $P_{ю}$ – мощность разрушения и погрузки горной массы опережающим шнеком, кВт.

Эффективность погрузки разрушенной горной массы зависит также от величины зазоров между вынесенным в уступ забоя корпусом и горным массивом, которые обуславливаются наличием дополнительных погрузочных устройств. На рис. 1 приведены возможные варианты компоновочных схем очистных комбайнов: без дополнительных погрузочных устройств (рис. 1а) – в этом случае вынесенный в уступ забоя корпус выполняет функцию погрузочного щитка с зазорами; с зачистным лемехом (рис. 1б); с полноразмерным погрузочным щитком (рис. 1в). Однако, как показали исследования [12], дополнительные погрузочные устройства снижают производительность очистного комбайна, а их применение на комбайнах, работающих в условиях тонких пологих пластов, приводит к весьма существенному снижению производительности. Поэтому в случае отсутствия ограничений по погрузке остатка горной массы самонавалкой посредством передвижки конвейера на «новую дорогу» целесообразно (исходя из условия обеспечения наибольшей производительности машины) использовать вынесенный в уступ забоя корпус как погрузочный щиток с зазорами.

Согласно расчетной схеме (см. рис. 1, вид А-А), площадь зазоров равна [12]:

$$S_{\text{заз}} = \begin{cases} 0,5 \cdot (D_{\text{ко}} - h_{\text{кор}}) \cdot B_3 + \\ + k_3 \cdot (B_3 - l_{\text{кор}}) \cdot h_{\text{кор}}, \\ \text{без дополнительных} \\ \text{погрузочных устройств} \\ 0,5 \cdot (D_{\text{ко}} - h_{\text{кор}}) \cdot (B_3 - l_{\text{кор}}) +, \text{ м}^2, \\ + k_3 \cdot (B_3 - l_{\text{кор}}) \cdot h_{\text{кор}}, \\ \text{зачистной лемех} \\ 0, \text{ полноразмерный} \\ \text{погрузочный щит} \end{cases}$$

здесь $h_{\text{кор}}$, $l_{\text{кор}}$ – высота и ширина вынесенного на забой корпуса комбайна, м; k_3 – коэффициент заполнения зазоров разрушенной горной массой [18].

Поскольку скребковый конвейер, на который опирается комбайн, своим бортом частично перекрывает окно выгрузки шнека, конвейер следует выбирать с минимальной высотой решетки H_k , обеспечивающей транспортирование всей разрушенной очистным комбайном горной массы [6, 7].

Частоту вращения шнека $n_{\text{об}}$ следует принимать исходя из выполнения условия:

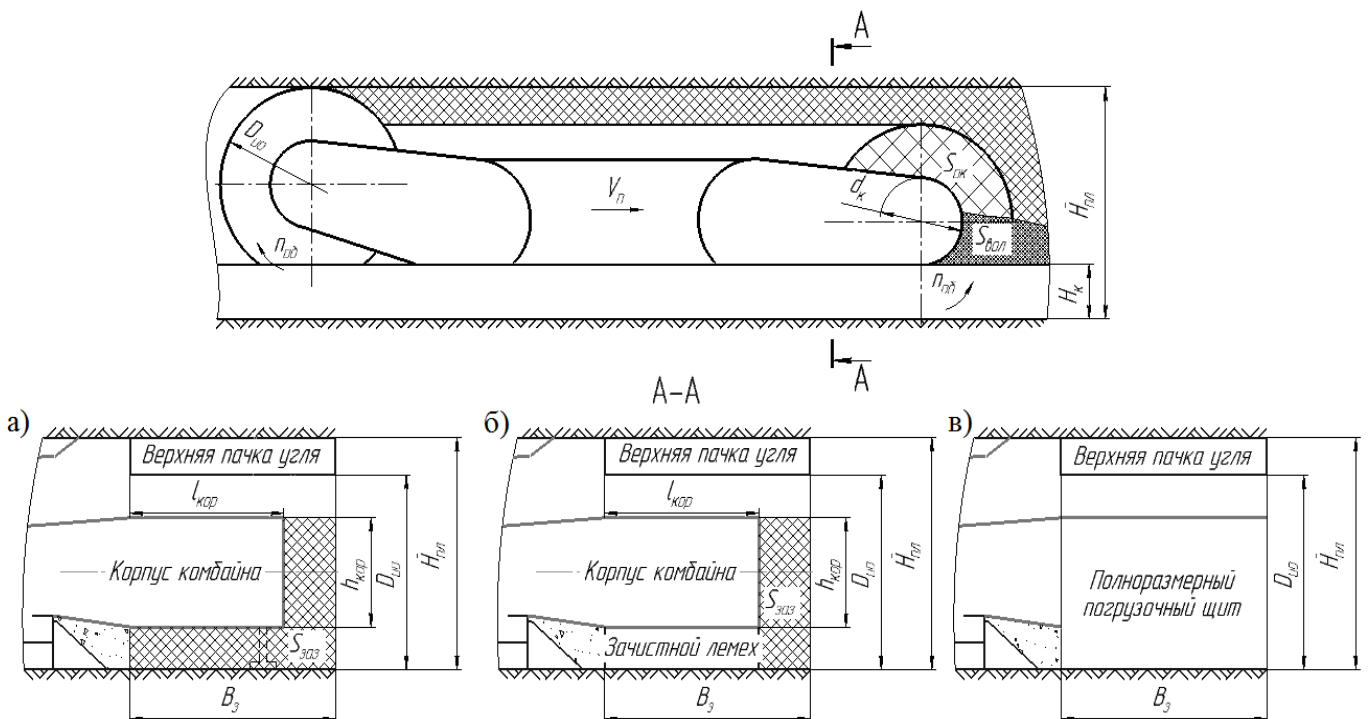


Рис. 1. К определению площади зазоров между угольным массивом и корпусом комбайна:

- а – без дополнительных погрузочных устройств;
- б – при оснащении зачистным лемехом;
- в – при оснащении полноразмерным погрузочным щитом

$$n_{об} = \min(n_{об}^{рез}, n_{об}^{пер}),$$

где $n_{об}^{рез}$ – максимальная частота вращения шнека, при которой отсутствует искрообразование и повышенный износ режущего инструмента:

$$n_{об}^{рез} = \frac{60 \cdot V_{рез}}{\pi \cdot D_{ио}}, \text{ об/мин,}$$

где $V_{рез}$ – критическая скорость резания исполнительного органа, м/с; $n_{об}^{пер}$ – максимальная частота вращения шнека по условию отсутствия циркуляции (переброса транспортируемой лопастью выгружаемой горной массы), об/мин.

На основе анализа результатов исследований [19] получена зависимость, позволяющая оценить изменение значения максимальной частоты вращения шнека по условию отсутствия циркуляции как функцию диаметра исполнительного органа:

$$n_{об}^{пер} = \frac{90}{\sqrt{D_{ио}}}, \text{ об/мин.}$$

При выборе значения скорости перемещения комбайна V_n необходимо учитывать ограничения, связанные с горно-геологическими и горно-техническими условиями эксплуатации [20]:

$$V_n = \min(V_n^{тяги}, V_n^{рез}, V_n^y, V_n^{мен}, V_n^{уст}, V_n^{чел}, V_n^{конв}, V_n^{кр}, V_n^{з.ф.}, V_n^{зав}),$$

где $V_n^{тяги}$ – допустимое значение скорости перемещения комбайна по условию обеспечения максимального тягового усилия привода подачи, м/мин [6]; $V_n^{рез}$ – ограничение скорости перемещения комбайна по вылету резца, м/мин [17]; $V_n^y, V_n^{теп}$ – ограничения скорости перемещения комбайна по условию устойчивого момента и тепловой мощности электродвигателя соответственно, м/мин [6, 7]; $V_n^{уст}$ – ограничение скорости перемещения комбайна по устойчивости корпусной подсистемы комбайна в геотехнической системе «комбайн – конвейер – крепь – забой», м/мин [6, 7]; $V_n^{чел}$ – допустимое значение скорости перемещения комбайна по условию обеспечения перемещения человека по очистному забою, м/мин [20, 21]; $V_n^{конв}$ – ограничение скорости перемещения комбайна по условию возможной производительности скребкового

конвейера, м/мин [7]; $V_n^{кр}$ – ограничение скорости перемещения комбайна по условию возможной скорости крепления механизированной крепью, м/мин [6,7]; $V_n^{з.ф.}$ – ограничение скорости перемещения комбайна по газовому фактору, м/мин [6]; $V_n^{зав}$ – граничная скорость перемещения по условию отсутствия циркуляции горной массы в рабочем пространстве шнека, м/мин.

Значение граничной скорости перемещения комбайна по условию отсутствия циркуляции горной массы в рабочем пространстве шнека можно определить по зависимости [8]:

$$V_n^{зав} = \frac{S_{ок}^{cp} \cdot \pi \cdot d_{см} \cdot tg\alpha_{л}^{cm} \cdot k_{отс} \cdot n_{об} \cdot N_{зах}}{D_{ио} \cdot B_з \cdot \rho \cdot \gamma^{-1} - S_{зав}}, \text{ м/мин,}$$

где $S_{ок}^{cp}$ – среднее значение площади окна выгрузки с учетом частичного его перекрытия «валком» не погруженной на забойный конвейер горной массы, расположенной перед окном погрузки, м²; $k_{отс}$ – коэффициент отставания выгружаемой горной массы от лопасти шнека в зоне разгрузочного торца исполнительного органа [3, 4]; $N_{зах}$ – количество лопастей шнека, шт; γ – плотность выгружаемой горной массы, т/м³ [22].

Оптимизация структуры и параметров очистного комбайна

Для апробации предложенного метода и разработанной математической модели оптимизации структуры и параметров очистных комбайнов со шнеками малых диаметров были проведены модельные исследования в представительных для шахтопластов Донбасса горно-геологических условиях эксплуатации: средняя мощность пласта 0,85 м; уголь вязкий, сопротивляемостью разрушению 360 кН/м; плотность угля в массиве 1,35 т/м³. Моделировалась работа комбайна без дополнительных погрузочных устройств, с двухзаходным шнеком, с постоянным шагом лопастей.

Для расчета комплексного критерия качества машины требуется задание коэффициентов весомости частных показателей качества. Основным макроуровневым параметром качества очистного комбайна является техническая производительность, характеризующая техническое совершенство и его потенциальные возможности.

Согласно исследованиям [23], масса (металлоемкость), а, следовательно, и вписываемость в разрабатываемый пласт комбайна напрямую зависят от значения мощности на раз-

рушение и погрузку горной массы опережающим шнеком. При этом от соотношения значений мощности и металлоемкости в значительной степени зависит ресурс комбайна.

Удельные энергозатраты являются комплексным показателем, отражающим эффективность принятых конструктивных и режимных параметров очистного комбайна при его эксплуатации в конкретных горно-геологических и горнотехнических условиях.

Значения коэффициентов весомости для технической производительности, мощности электродвигателя привода шнека, удельных энергозатрат разрушения и погрузки горной массы принимались равными 0,5; 0,4 и 0,1 соответственно, исходя из экспертной оценки авторов.

Анализ выполненных модельных исследований позволил установить, что максимальное значение комплексного критерия качества комбайна, эксплуатируемого в заданных горно-геологических и горнотехнических условиях, в общем случае обусловлены ограничениями, которые накладываются на скорость перемещения комбайна. Эти ограничения целесообразно классифицировать по следующим факторам: по условию отсутствия циркуляции горной массы в рабочем пространстве шнека; по скорости перемещения человека в забое; по технической производительности (например, по газовому факто-

ру); по устойчивой мощности электродвигателя привода исполнительного органа. На рис. 2 приведены значения комплексных критериев качества в зависимости от параметров очистного комбайна.

Установлено также, что при наличии ограничений некоторые сочетания параметров (например, значений диаметра и ширины захвата шнека) не могут быть использованы. Так, при ограничении скорости подачи комбайна по фактору скорости перемещения человека в забое $V_{п} \leq V_{п}^{чел}$ [19, 22] (см. рис. 2б) применение шнеков диаметром 0,63 м с шириной захвата 0,9...0,7 м не может быть реализовано.

Анализ результатов моделирования по разработанной оптимизационной модели показывает:

– в случае ограничения скорости перемещения комбайна по условию отсутствия циркуляции горной массы в рабочем пространстве опережающего исполнительного органа $V_{п} \leq V_{п}^{зав}$ (см. рис. 2а) существенное повышение производительности (на 28...14 %) можно обеспечить за счет уменьшения ширины захвата шнека с 0,9 м до 0,5 м. При этом ширина захвата оказывает более существенное влияние на производительность комбайна при меньших значениях диаметра исполнительного органа.

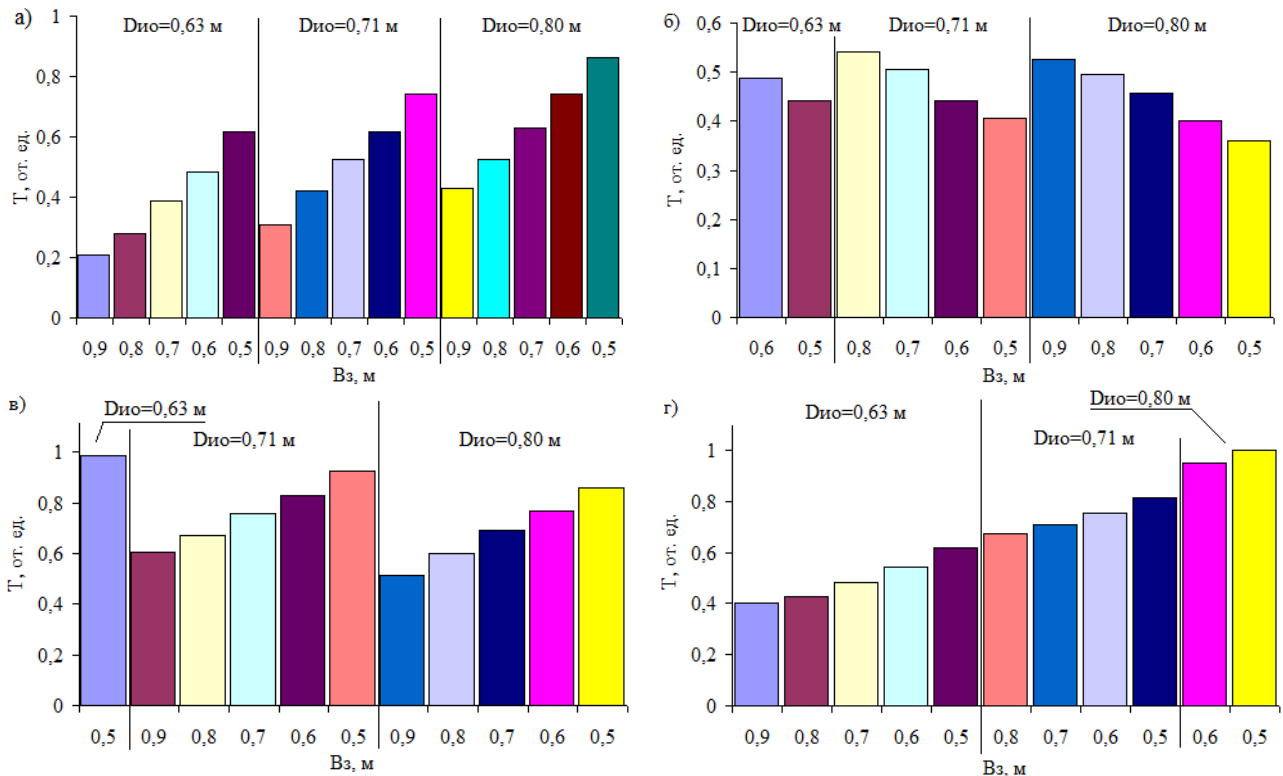


Рис. 2. Результаты оптимизации параметров очистного комбайна с учетом ограничений:
 а – по условию отсутствия циркуляции горной массы в рабочем пространстве шнека;
 б – по скорости перемещения человека в забое; в – по технической производительности;
 г – по устойчивой мощности электродвигателя привода исполнительного органа

Мощность на разрушение и погрузку горной массы с уменьшением ширины захвата шнека с 0,9 м до 0,5 м снижается на величину порядка 50 % при всех значениях его диаметра из рассмотренного диапазона возможного изменения. А удельные энергозатраты разрушения и погрузки горной массы при уменьшении ширины захвата шнека снижаются в 2,0...1,8 раза, соответственно, при изменении диаметра шнека от 0,63 м до 0,80 м.

Максимальное значение комплексного критерия качества T достигается при работе комбайна со шнеком диаметром, близким к средней мощности пласта и с наименьшей из рекомендуемого диапазона шириной захвата;

– в случае ограничения скорости перемещения комбайна по человеческому фактору $V_{II} \leq V_{II}^{чел}$ [19, 22] (см. рис. 2б), при увеличении ширины захвата от 0,5 м до 0,9 м наблюдается существенный рост технической производительности (до 57 %). Однако при этом имеет место увеличение мощности и удельных энергозатрат на разрушение и погрузку угля примерно в 2,0 и 1,2 раза соответственно.

Максимальное значение комплексного критерия качества T достигается при работе комбайна со шнеком диаметром 0,71 м и шириной его захвата 0,8 м. В этом случае имеет место близкое к максимальному значение технической производительности и снижение потребной мощности электродвигателя привода исполнительного органа на величину до 25 %;

– в случае ограничения по производительности комбайна по газовому фактору $Q_{тех} \leq Q_{тех}^{гф}$ (см. рис. 2в), уменьшение ширины захвата с 0,9 м до 0,5 м при увеличении диаметра шнека от 0,71 м до 0,80 м обуславливает уменьшение мощности на разрушение и погрузку горной массы опережающим шнеком на величину порядка 50 % и снижение удельных энергозатрат работы комбайна на 67...65 % соответственно. Применение шнека диаметром 0,63 м с шириной захвата 0,5 м определяет уменьшение энергоемкости процессов разрушения и погрузки мощности на опережающем шнеке на величину порядка 35 %, что обуславливает наибольшее значение комплексного критерия качества T ;

– при ограничении по устойчивой мощности электродвигателя привода исполнительного органа $P_{ию} \leq P_{ию}^{уст}$ (см. рис. 2г) наблюдается закономерность, аналогичная для случая ограничения скорости перемещения по условию отсутствия циркуляции горной массы в рабочем пространстве шнека. Уменьшение ширины захвата шнека с 0,9 м до 0,5 м при одновременном уве-

личении диаметра шнека от 0,63 м до 0,80 м, также обеспечивает значительное увеличение технической производительности (примерно в 1,9 раза) и снижение удельных энергозатрат разрушения и погрузки горной массы комбайном примерно в 3,2 раза. Т.е. максимальное значение комплексного критерия качества T достигается при работе комбайна со шнеком диаметром, близким к средней мощности пласта с наименьшей из стандартного диапазона шириной захвата.

Таким образом, при выборе рациональных структуры и параметров очистных комбайнов на основе предложенной математической модели оптимизации с использованием имитационной модели функционирования очистных комбайнов в условиях тонких пологих пластов [15] необходимо учитывать заданные конкретные горно-геологические и горнотехнические условия и связанные с ними ограничения. В общем случае максимальная техническая производительность комбайна при удовлетворительном уровне энергоемкости работы достигается со шнеком с диаметром, близким к средней мощности пласта и с наименьшей из стандартного диапазона шириной захвата.

Выводы

Разработана математическая модель оптимизации структуры и параметров очистных комбайнов со шнековыми исполнительными органами малых диаметров, позволяющая на основе метода свертывания критериев устанавливать рациональные геометрические параметры шнека, частоту его вращения и диаметр качалки редуктора привода резания в зоне окна выгрузки для обеспечения максимальной технической производительности комбайна при удовлетворительном уровне энергозатрат в заданных горно-геологических и горнотехнических условиях с учетом факторов, ограничивающих скорость перемещения.

Установлено, что при отсутствии ограничений по производительности и человеческому фактору максимальная техническая производительность при удовлетворительной энергоемкости достигается при работе комбайна с граничной по условию отсутствия циркуляции горной массы в рабочем пространстве шнека скоростью перемещения. Диаметр шнека при этом необходимо принимать близким к средней мощности пласта с наименьшей из принятого диапазона шириной захвата.

Рациональные значения параметров очистных комбайнов для выемки тонких пологих пластов целесообразно определять на основе ком-

плексного использования двух разработанных математических моделей – модели оптимизации структуры и параметров очистных комбайнов для выемки тонких пологих пластов по комплексному критерию качества и имитационной модели функционирования очистных комбайнов в условиях тонких пологих пластов с учетом заданных конкретных горно-геологических и горнотехнических условий и связанных с ними ограничений.

Список литературы

1. Горные машины для подземной добычи угля: Учебное пособие для вузов / П.А. Горбатов и др. / Под общей ред. П.А. Горбатова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Донецк: Норд Компьютер, 2006. – 669 с.
2. Нечепаяев, В.Г. Механо-гидравлические шнековые системы выгрузки и транспортирования. – Донецк: ДонНТУ, 2005. – 215 с.
3. Бойко, Н.Г. Очистные комбайны для тонких пластов. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2010. – 476 с.
4. Исполнительные органы очистных комбайнов для тонких пологих пластов / Н.Г. Бойко [и др.]. – Донецк, Донеччина, 1996. – 223 с.
5. Миничев, В.Г. Угледобывающие комбайны. Конструирование и расчет. – М.: Машиностроение, 1976. – 248 с.
6. Разрушение углей выемочными машинами / Е.З. Позин, [и др.] / Под общей ред. Е.З. Позина. – М.: Недра, 1984. – 288 с.
7. Проектирование и конструирование горных машин и комплексов: Учебник для вузов / Г.В. Малеев [и др.]. – М.: Наука, 1988. – 368 с.
8. Методика выбора параметров очистных комбайнов со шнеками малых диаметров применительно к заданным горно-геологическим условиям / О.Е. Шабаев [и др.] // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2020. – №3. – С. 43-51.
9. Шабаев, О.Е. Оценка влияния ширины захвата шнекового исполнительного органа очистного комбайна для тонких пологих пластов на энергетические параметры машины. О.Е. Шабаев, Е.Ю. Степаненко, П.П. Зинченко // Инновационные перспективы Донбасса, г. Донецк, 22-25 мая 2018 г. – Донецк: ДонНТУ, 2018. Т. 3: 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. – 2018. – С. 47-50.
10. Шабаев, О.Е. Экспериментальные исследования влияния ширины захвата шнекового исполнительного органа комбайна на эффективность процесса погрузки / О.Е. Шабаев, П.П. Зинченко, А.В. Мезников // Горные науки и технологии. – 2019. – №2. – С. 90-103.
11. К определению технической производительности очистных комбайнов, работающих в условиях тонких и весьма тонких пологонаклонных пластов / О.Е. Шабаев [и др.] // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2019. – №4. – С. 44-52.
12. Влияние дополнительных погрузочных устройств на производительность очистных комбайнов со шнеками малых диаметров / О.Е. Шабаев [и др.] // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики, 16-я Международная конференция по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. В 2 т. Т.1. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2020. – С. 187-194.
13. Научные основы многокритериального синтеза горных машин как пространственных многомассовых динамических систем переменной структуры: дис.... докт. техн. наук: 05.05.06 / Семенченко Анатолий Кириллович. – Донецк, 1997. – 360 с.
14. Почтман, Ю.М. Модели и методы многокритериальной оптимизации конструкций: Учебное пособие. – Д.: ДГУ, 1984. – 132 с.
15. Имитационная модель функционирования шнековых очистных комбайнов, предназначенных для выемки тонких пологонаклонных пластов / В.Г. Нечепаяев [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2019. – №2(65). – С. 26-34.
16. ГОСТ 28600-90 Комбайны очистные. Основные параметры и размеры. Общие технические требования. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 5 с.
17. КД 12.10.040-99. Изделия угольного машиностроения. Комбайны очистные. Методика выбора параметров и расчета сил резания и подачи на исполнительных органах (взамен ОСТ12.44.258-84). Введен с 01.01.2000. – Донецк: Минуглепром Украины, 1999. – 75 с.
18. Тарасевич, В.И. Активные и пассивные зоны окна выгрузки угля для шнеков малого диаметра очистного комбайна // В.И. Тарасевич, А.В. Тарасевич // Научные труды Международной конференции «Горное оборудование-2005». – Донецк: ДонНТУ, 2005. – С. 83-93.
19. Исследование и определение параметров шнеков с переменным шагом очистных комбайнов для тонких пластов с целью повышения их погрузочной способности: автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.05.06 / Нечепаяев Валерий Георгиевич. – Донецк, 1982. – 21 с.

20. Горбатов, П.А. Выемочные комбайны нового поколения как энергетические системы мехатронного класса / П.А. Горбатов, В.В. Косарев, Н.М. Лысенко. – Донецк: Ноулидж, 2010. – 176 с.
21. Сургай, Н.С. Производительность очистных комбайнов нового технического уровня и пути ее повышения. Н.С. Сургай, В.В. Виноградов, Ю.И. Кияшко. – 2001. – Уголь Украины. – №6. – С. 3-5.
22. Зенков, Р.Л. Механика насыпных грузов.– М.: Машиностроение, 1964. – 251 с.
23. Методика определения удельных энергозатрат разрушения и погрузки очистных комбайнов для тонких пластов в реальных условиях эксплуатации / О.Е. Шабаетв и др. // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2017. – № 4.– С. 28-33.

О.Е. Shabaev /Dr. Sci. (Eng.)/, V.G. Nechepayev / Dr. Sci. (Eng.)/, P.P. Zinchenko
Donetsk National Technical University (Donetsk)

MATHEMATICAL MODEL FOR OPTIMIZING THE PARAMETERS OF SHEARERS WITH SMALL DIAMETER AUGERS

Background. *The work of shearers on layers with a capacity of 0.55...1.20 m is characterized by low efficiency due to the insufficient loading capacity of screw actuators of small diameters. Therefore, when creating shearers capable of intensively extracting coal from coal seams with a capacity of 0.55...1.20 m, it is necessary to increase the efficiency of the process of loading the destroyed rock mass with small diameter augers, which can be achieved by choosing a rational (for the given mining and geological operating conditions) structure and parameters of shearers.*

Materials and/or methods. *A mathematical model for optimizing the structure and parameters of shearers with screw actuators of small diameters is developed, which allows, based on the method of folding criteria, to set rational parameters of the auger, its rotation frequency and the diameter of the rocking gear of the cutting drive in the area of the unloading window, ensuring the maximum technical performance of the shearer at an acceptable level of energy consumption in the given mining and geological conditions, taking into account the limiting factors of the movement speed.*

Results. *It is established that in the absence of restrictions on productivity and the human factor, the maximum technical productivity at an acceptable energy intensity is achieved when the shearer operates with a boundary speed of movement under the condition of the absence of rock mass circulation in the working space of the auger with a diameter close to the average layer capacity with the smallest of the accepted range of the width of the gripper.*

Conclusion. *In general, the rational values of the parameters of shearers should be determined based on the proposed mathematical optimization model using a simulation model of the operation of shearers in thin shallow layers, taking into account specific mining-geological and mining-technical conditions and related restrictions.*

Keywords: *mathematical model for optimization, small diameter auger, technical performance, specific energy consumption, rational parameters of the shearer.*

Сведения об авторах

О.Е. Шабаетв

SPIN-код: 1447-2343
 ORCID iD: 0000-0002-0845-7449
 Телефон: +380 (95) 429-13-32
 Эл. почта: oeshabaev@yandex.ru

В.Г. Нечепаетв

ORCID iD: 0000-0003-4016-1661
 Телефон: +380 (71) 391-12-64
 Эл. почта: nechepayev@mech.donntu.org

П.П. Зинченко

SPIN-код: 4710-7409
 ORCID iD: 0000-0002-4070-2715
 Телефон: +380 (66) 427-45-36
 Эл. почта: pawel.zin4encko@yandex.ru

Статья поступила 28.01.2021

*© О.Е. Шабаетв, В.Г. Нечепаетв, П.П. Зинченко, 2021
 Рецензент д.т.н., проф. В.П. Кондрахин*