

УДК 622.232.7

В.П. Кондрахин (д-р техн. наук, проф.)**Н.И. Стадник** (д-р техн. наук, доц.)

Донецкий национальный технический университет

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОМБАЙНОВ ДЛЯ ВЫЕМКИ ТОНКИХ ПЛАСТОВ С ВЫНЕСЕННОЙ И ВСТРОЕННОЙ СИСТЕМАМИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Разработаны критерии оценки и выполнен анализ очистных комбайнов для выемки тонких пластов с вынесенными и встроенными системами перемещения. Установлены области применения комбайнов с указанными компоновочными схемами.

Ключевые слова: очистной комбайн, анализ, компоновочные схемы, критерии, механизм перемещения

Проблема и ее связь с научными или практическими задачами. Комбайнами с вынесенными системами перемещения (ВСП) оснащены примерно треть очистных забоев тонких пластов на шахтах Украины. Они обеспечивают около 40% добычи, причем эта доля постоянно растет по мере вытеснения морально устаревших комбайнов 1К101У современными машинами УКД200-250 и УКД200-400. Применение вынесенных систем перемещения на тонких пластах имеет ряд преимуществ по сравнению с встроенными системами с цепным тяговым органом:

- повышение безопасности за счет использования закрытой конструкции направляющих тяговой цепи;

- сокращение размера «жесткого» корпуса комбайна (например, комбайн УКД200-250 короче комбайна 1К101У на 9,5%.

В ближайшие годы комбайны с ВСП (в первую очередь УКД200-250 и УКД200-400) будут являться в Украине базовой техникой для добычи угля из тонких пластов. Однако тягово-скоростные характеристики (тяговое усилие до 200 кН и скорость до 5 м/мин), область применения (лавы длиной до 180 м) и показатели надежности системы перемещения ВСП не отвечают возросшим требованиям практики.

Одной из важных задач, требующих решения при выборе направления дальнейшего развития очистных комбайнов для выемки тонких пластов, является обоснование типа механизма перемещения

(встроенный или вынесенный) и области рационального применения этих механизмов.

Анализ исследований и публикаций. В работах [1, 2] выполнено обоснование критериев оценки компоновочных схем очистных комбайнов с точки зрения их энерговооруженности, массы и габаритных размеров. Однако для полного сравнительного анализа комбайнов с вынесенными и встроенными механизмами перемещения этих критериев не достаточно.

Постановка задачи. Целью работы является обоснование наиболее полной системы критериев и проведение анализа компоновочных схем очистных комбайнов для выемки тонких пологих пластов с встроенными и вынесенными механизмами перемещения и оценка на этой основе рациональных областей применения таких машин.

Изложение материала и результаты. В настоящей работе рассматриваются встроенные механизмы перемещения только с жестким тяговым органом ввиду их общепризнанных преимуществ перед аналогичными встроенными механизмами с цепным органом. Для сокращенного обозначения таких механизмов перемещения будем применять традиционную аббревиатуру БСП (бесцепная система подачи).

В качестве критериев сравнения ВСП и БСП предлагается использовать следующие количественные и качественные критерии.

1) Критерий – масса $m_{\text{дв}}$ движущихся частей системы «комбайн - тяговый орган» [2].

2) Критерий – КПД тягового органа $\eta_{\text{мо}}$, который учитывает потери тягового усилия механизма перемещения, обусловленные необходимостью перемещать сам тяговый орган.

Очевидно, что при неподвижном жестком тяговом органе БСП эти потери можно считать равными 0, и тогда $\eta_{\text{мо}} = 1$. Для вынесенной системы перемещения рассмотрим эпюру распределения натяжения тяговой цепи на рабочей (верхней) ветви (см. рис. 1). Здесь рассматривается типичный случай работы ВСП, когда тяговое усилие на комбайне создается тянущим приводом, а подтягивающий только перемещает нижнюю ветвь цепи.

Из рис. 1 следует, что

$$\eta_{\text{мо}} = \frac{Q_n}{Q_{\text{пр}}} = \frac{Q_n}{Q_n + Q_x(l_x) + (Q_{\text{пр}} - Q_k)}, \quad (1)$$

где Q_n - полезное тяговое усилие, обеспечивающее перемещение комбайна;

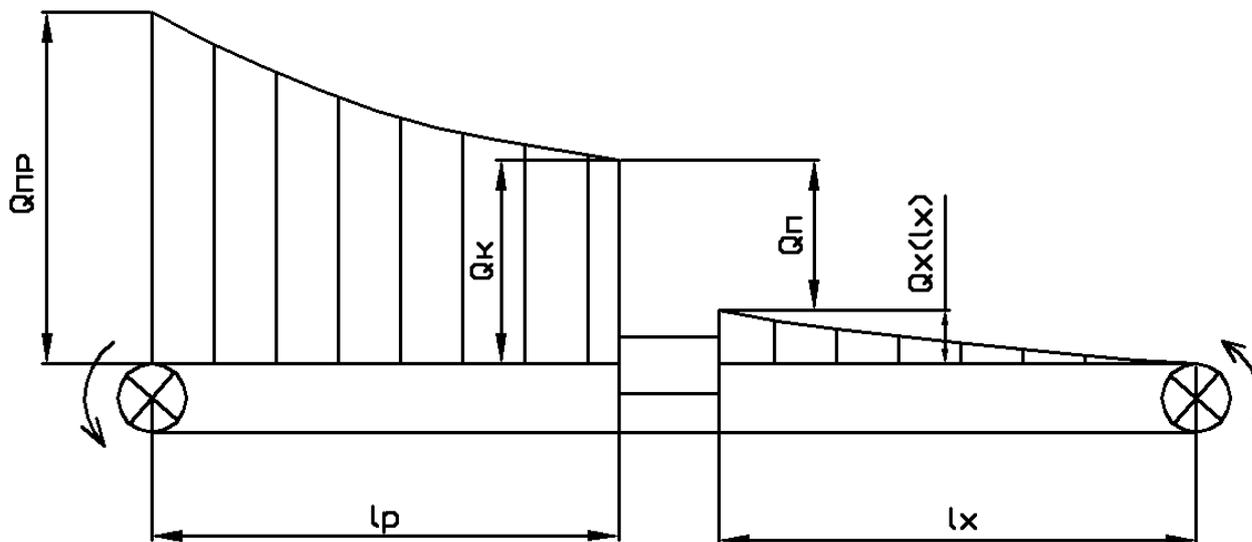


Рис. 1 – Эпюра распределения натяжения цепи ВСП на рабочей (верхней) ветви.

Q_{np} - тяговое усилие на приводной звездочке;

Q_k - усилие в рабочей части верхней ветви цепи у комбайна;

$Q_x(l_x)$ - усилие в холостой части верхней ветви цепи у комбайна.

Из анализа потерь в цепи, выполненного в работе [2], следует:

$$Q_x(l_x) = \frac{P}{k} (e^{kl_x} - 1) \quad (2)$$

где

$$P = q_c g (f_{mp} \cos \alpha \pm \sin \alpha);$$

q_c - погонная масса цепи;

g - ускорение свободного падения;

f_{mp} - коэффициент трения цепи о направляющие конвейера;

α - угол падения пласта.

k - удельный (на 1 м цепи) показатель потерь, зависящих от натяжения цепи и степени искривленности конвейерного става. По результатам шахтных замеров тяговых усилий в цепи и нагрузок на привод механизмов перемещения можно сделать оценку численных значений этого параметра: $k = (0,77 \dots 2,67) \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ в зависимости от степени искривленности конвейерного става.

Подставляя в (1) выражение (2) после преобразований получим формулу для определения критерия $\eta_{то}$:

$$\eta_{mo} = \frac{Q_n}{\left[Q_n + \frac{P}{k} (e^{kl_x} - 1) \right] e^{kl_p} + \frac{P}{k} (e^{kl_p} - 1)}. \quad (3)$$

3) Группа критериев – среднее квадратическое отклонение (СКО) величин, характеризующих динамические процессы в силовых подсистемах комбайна:

- скорости перемещения $\sigma_{vп}$;
- тягового усилия $\sigma_{Qк}$;
- мощности привода исполнительного органа σ_P ;
- крутящих моментов в трансмиссии к отстающему и опережающему шнекам $\sigma_{Mот}$, $\sigma_{Mоп}$;
- усилия в опорах комбайна (принята передняя завальная опора) σ_{Ro} ;
- момента в подсистеме подвески опережающего шнека $\sigma_{Mпо}$.

Указанные критерии целесообразно анализировать в нормированном виде, причем за единицу принимаются соответствующие параметры БСП. Для анализа рассматриваемых критериев необходимо использовать данные натуральных или вычислительных экспериментов. В настоящее время отсутствуют экспериментальные данные о динамических нагрузках в подсистемах комбайнов для выемки тонких пластов, работающих с гибким и жестким тяговым органом в одинаковых условиях. Вследствие этого рассматриваемые критерии определялись в результате вычислительных экспериментов с использованием имитационной математической модели процесса функционирования очистного комбайна для выемки тонких пластов, которая комплексно учитывает все основные факторы, определяющие интенсивные рабочие режимы комбайна [3].

Адекватность этой математической модели оценивалась путем сравнения результатов натуральных и вычислительных экспериментов. В таблице 1 приведены математические ожидания (средние значения) мощности привода резания P и тягового усилия Q_k очистного комбайна УКД200-250, полученные в шахтном эксперименте (шахта «Павлоградская») и при моделировании. На основании приведенных данных можно сделать вывод о том, что погрешность моделирования не превышает 20%, и используемая для анализа математическая модель в основном адекватна реальной системе «очистной комбайн – забой».

Таблица 1 - Сравнение результатов шахтных и вычислительных экспериментов

Параметр	Эксперимент	Модель	Отклонение, %
P, кВт	120	140,5	17,1
Q _к , кН	150	134,6	-10,3

4) Критерий - предельно достижимые тягово-скоростные характеристики.

Необходимость анализа этого критерия определяется тем, что максимальное тяговое усилие T_{\max} и максимальная скорость V_{\max} являются основными параметрами, определяющими эффективность механизма перемещения

5) Критерий - уровень безопасности работы очистного комбайна.

Количественная оценка данного критерия предполагает наличие сведений о количестве несчастных случаев, связанных с порывом тяговой цепи ВСП, а также при авариях, связанных с поломками БСП. При отсутствии этих данных оценка по данному критерию возможна только на качественном уровне.

6) Критерий - удобство технического обслуживания и ремонта. Количественная оценка этого критерия предполагает наличие объективных данных о трудоемкости технического обслуживания и ремонта ВСП и БСП, работающих в одинаковых или близких условиях. При отсутствии этих данных оценка по данному критерию возможна только на качественном уровне.

7) Критерий - стоимость механизма перемещения. При прочих равных условиях разница в стоимости механизмов перемещения ВСП и БСП определяется прежде всего стоимостью тягового органа.

Результаты сравнительного анализа встроенных и вынесенных механизмов перемещения

1) Анализ по критерию «масса $m_{\text{дв}}$ движущихся частей системы «комбайн - тяговый орган». В работе [2] выполнен анализ этого критерия для комбайнов, оснащенных ВСП (УКД200-250, К103М) и БСП (УКД300). При этом установлено, что уже при длине очистного забоя $L=113$ м критерий $m_{\text{дв}}$ для комбайна УКД200-250 становится больше, чем у более тяжелого комбайна УКД300 с БСП. При длине лавы 350 м масса движущихся частей комбайна УКД200-250 превышает соответствующий параметр УКД300 в 1,4 раза.

Таким образом, при работе комбайнов в лавах длиной более 100-200м более легкие комбайны с ВСП имеют существенно (до 1,4 раза) большую массу подвижных частей (с учетом движущегося тягового органа) по сравнению с комбайном УКД300, оснащенного БСП. На практике это означает, что комбайны с ВСП в длинных лавах будут иметь сравнительно более высокие пусковые нагрузки механизма перемещения и тягового органа и увеличенную по сравнению с БСП длину свободного выбега (тормозной путь) при остановке.

2) *Анализ по критерию «КПД тягового органа $\eta_{то}$ ».* Как отмечалось выше, для БСП этот параметр можно принимать равным единице. КПД тягового органа ВСП существенно зависит от его длины, удельного показателя потерь, коэффициента трения цепи о направляющие и угла наклона пласта (при подвигании забоя по простиранию).

Графики зависимости КПД от длины рабочего участка цепи для характерных значений удельных показателей потерь и предельных значений угла падения пласта (выемка снизу вверх) приведен на рис. 2. Как видно из рис. 2, при $\alpha=0^\circ$ с увеличением длины рабочего участка цепи до 300 м КПД тягового органа снижается от значений 0,92...0,94 до 0,43...0,75. Увеличение угла падения приводит к снижению КПД.

При работе комбайна с ВСП на пологих пластах в лавах длиной до 200 м при спокойной гипсометрии пласта ($k \approx 0,00077 \text{ м}^{-1}$, $\alpha \approx 0^\circ$) КПД тягового органа не уменьшается ниже 0,8, что, по-видимому, можно считать приемлемым значением.

В самом неблагоприятном случае ($k=0,0027 \text{ м}^{-1}$, $\alpha=35^\circ$, $l_p = 300$ м) КПД тягового органа может снижаться до 0,4. Это означает, что 60 % энергии привода механизма перемещения, которая подводится к тяговому органу, расходуется на преодоление сил сопротивления движению самого органа и, в конечном итоге, на износ цепи и направляющих.

Таким образом, в длинных очистных забоях с искривленной линией конвейерного става на пластах наклонного падения встроенные системы перемещения с неподвижным тяговым органом имеют преимущества перед вынесенными системами перемещения с точки зрения их энергетической эффективности.

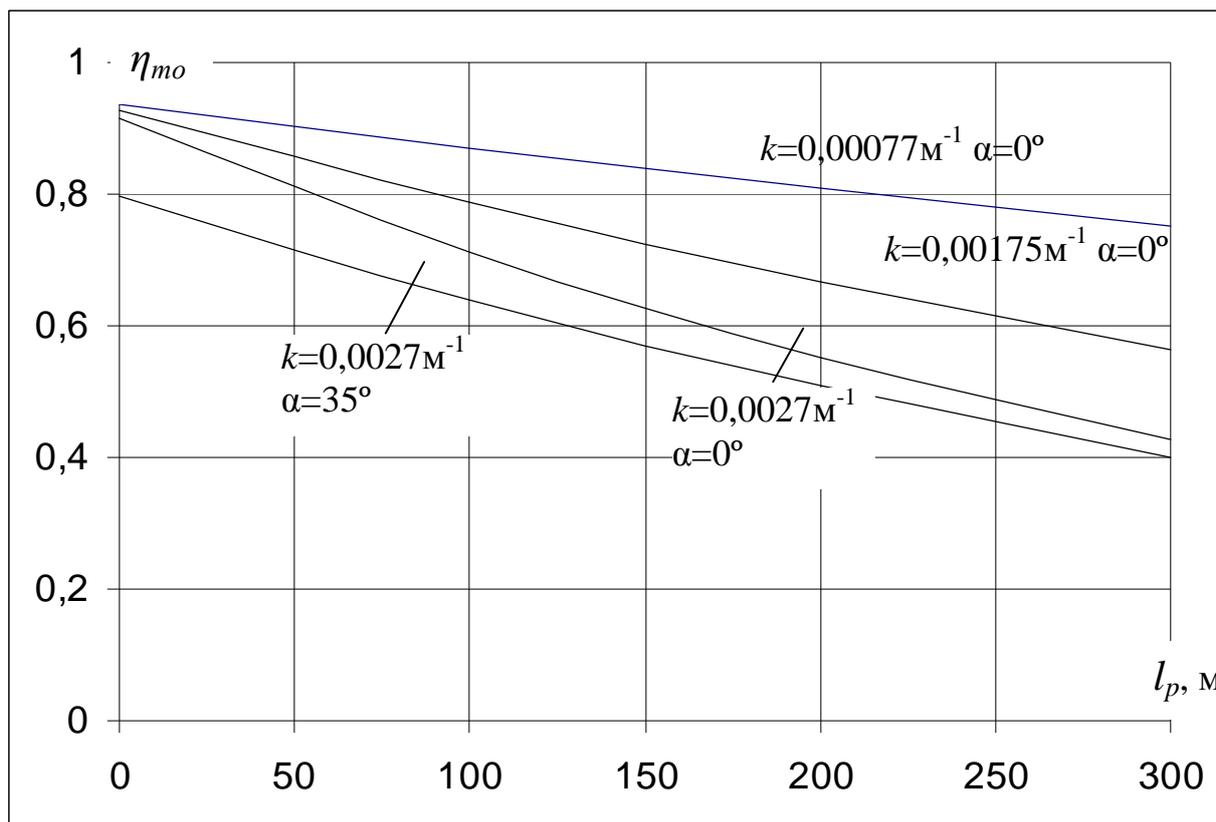


Рис. 2 – Графіки залежності КПД робочей ветви тягового органа від її довжини

3) *Анализ по группе критериев «средние квадратические отклонения (СКО) величин, характеризующих динамические процессы в силовых подсистемах комбайна».* Значення указаних критериев отримані шляхом статистичної обробки результатів чисельних експериментів. Параметри математичної моделі при проведенні чисельних експериментів відповідали комбайну УКД200-250. Для імітації роботи цього комбайна з жорстким тяговим органом при моделюванні значення коефіцієнта жорсткості тягового органа приймався відповідно до рекомендацій роботи [4]. Для аналізу приймався режим роботи комбайна зі швидкістю 3 м/мін в типових для даного комбайна горно-геологічних умовах. Для комбайна з ВСП моделювання виконувалося для трьох значень довжини робочого участка тягової ланки: 20 м, 100 м і 300 м. Результати обробки даних чисельних експериментів наведені в таблиці 2. Аналіз даних таблиці 2 показує, що підвищення жорсткості тягового органа (зменшення довжини робочого участка ланки для ВСП) призводить до зниженню динамічності навантажень в силових підсистемах очистного комбайна і нерівномірності швидкості його переміщення.

Таблица 2 - Нормированные значения среднеквадратических отклонений динамических параметров очистного комбайна при работе с гибким (ВСП) и жестким (БСП) тяговыми органами

	Длина цепи l_p , м	Среднее квадратическое отклонение, о.е.						
		$\sigma_{Vп}$	$\sigma_{Qк}$	σ_P	$\sigma_{Mот}$	$\sigma_{Mоп}$	$\sigma_{Rо}$	$\sigma_{Mпо}$
БСП	-	1	1	1	1	1	1	1
ВСП	20	1,70	0,103	1,02	1,10	1,06	1,08	1,14
	100	2,86	0,045	1,54	1,10	1,79	1,15	2,64
	300	2,52	0,015	1,54	1,08	1,69	1,14	2,55

Исключение составляет тяговое усилие Q_k , амплитуды колебаний которого многократно повышаются при повышении коэффициента жесткости тягового органа. Наиболее важными параметрами, определяющим ресурс очистного комбайна, являются величины σ_P и $\sigma_{Mоп}$, которые характеризуют динамическую нагруженность подсистемы привода опережающего исполнительного органа. При наличии жесткого тягового органа достигается снижение в 1,7...1,8 раза СКО момента в редукторе $\sigma_{Mоп}$ и в 1,5 раза СКО мощности электродвигателя привода исполнительных органов σ_P . Кроме того, при использовании БСП снижаются в 2,5..2,6 раза СКО нагрузок в подсистеме подвески исполнительных органов и на 15% - СКО нагрузок в опорно-направляющей подсистеме комбайна.

Снижение СКО динамических нагрузок в подсистеме привода исполнительных органов при использовании БСП происходит за счет уменьшения размахов низкочастотных (1-2 Гц) колебаний, обусловленных неравномерностью скорости перемещения машины.

Таким образом, встроенные механизмы перемещения с жестким тяговым органом (БСП) имеют преимущества перед ВСП с точки зрения динамической нагруженности и ресурса подсистем привода, подвески исполнительных органов и опорно-направляющего устройства. Однако динамическая нагруженность тягового органа и привода

механизма перемещения при использовании встроенных механизмов с жестким тяговым органом выше, чем при использовании ВСП.

Следует отметить, что используемая для анализа математическая модель не учитывает циклическое перераспределение нагрузки между приводами БСП при использовании частотно-регулируемого электропривода. Как показано в работе [5], в этом случае дополнительно возникают колебания нагрузки в приводе механизма перемещения БСП, обусловленные несовершенством зубчатых зацеплений в трехэлементном двигателе. Наличие указанных колебаний в еще большей степени подтверждает вывод о преимуществе ВСП с точки зрения динамической нагруженности привода механизма перемещения.

4) *Анализ по критерию «достижимые тягово-скоростные характеристики».* Повышение тяговых характеристик (т.е. усилия подачи, приложенного к комбайну) механизмов перемещения ограничивается, прежде всего, прочностью тягового органа и узлов передачи усилия на корпус комбайна. В этом смысле БСП имеет некоторое преимущество перед ВСП, так как прочность жесткого тягового органа, конструктивно связанного с рештаком забойного конвейера, значительно выше, чем круглозвенной цепи.

С точки зрения нагрузок и прочности узлов передачи тягового усилия на корпус комбайна, БСП и ВСП примерно равноценны. У вынесенных систем перемещения узел передачи усилия может быть только один, соответственно нагрузки на узел и корпус комбайна равны тяговому усилию, которое в установившихся режимах движения изменяется незначительно. БСП имеет, как правило, два двигателя, то есть 2 узла передачи усилия на корпус. Однако, как показано в работе [5], в процессе зацепления зубьев с цевочной рейкой нагрузка распределяется между двигателями неравномерно, коэффициент вариации нагрузки в приводе подачи равен $0,2...0,36$, а в особо неблагоприятных случаях двигатели работают практически попеременно. Поэтому при расчете на прочность следует рассматривать случай, когда передача тягового усилия на комбайн производится одним узлом, то есть так же, как ВСП.

С точки зрения расчета на выносливость усталостные повреждения в узле передачи усилия БСП при прочих равных условиях накапливаются быстрее, чем в ВСП. Это обусловлено тем, что неравномерность нагрузки и амплитуды напряжений в узлах передачи усилия на корпус комбайна для БСП выше, чем для узла ВСП (см. табл. 2).

С точки зрения достижимых скоростей перемещения, оба типа систем перемещения имеют примерно одинаковые возможности.

В целом с точки зрения достижимых тягово-скоростных характеристик, вне зависимости от длины очистного забоя, некоторое преимущество имеют встроенные механизмы перемещения с жестким тяговым органом, поскольку при их использовании прочность тягового органа не ограничивает возможности повышения тягового усилия.

5) *Анализ по критерию «уровень безопасности эксплуатации очистного комбайна».*

Известно, что для ВСП характерна повышенная опасность травматизма рабочих в случае порыва тяговой цепи. Кроме того, при работе на пластах с углом падения свыше 9° обрыв тяговой цепи может привести к сползанию комбайна и цепи вниз по лаве под действием собственного веса, что также может привести к несчастным случаям. Поэтому при работе в таких условиях «Правилами безопасности...» предусматривается оснащение комбайна предохранительной лебедкой.

Комбайны с БСП и жестким тяговым органом лишены подобных недостатков. Следовательно, по этому критерию встроенные системы перемещения с жестким тяговым органом имеют существенные преимущества по сравнению с ВСП.

6) *Анализ по критерию «удобство технического обслуживания и ремонта».* При работе в условиях тонкого пласта техническое обслуживание и ремонт оборудования, расположенного непосредственно на комбайне, крайне затруднены из-за ограниченности свободного пространства в лаве. Поэтому ВСП, расположенные на штреке, имеют существенные преимущества перед БСП по рассматриваемому критерию.

7) *Анализ по критерию «стоимость механизма перемещения».* Учитывая отсутствия объективных данных о ценообразовании при производстве механизмов перемещения ограничимся качественной констатацией того общеизвестного факта, что стоимость тягового органа (цевочной или зубчатой рейки) БСП существенно выше стоимости круглозвенной цепи, используемой в качестве тягового органа ВСП. Стоимость остальных элементов (частотный преобразователь и два привода) примерно одинакова для обоих сравниваемых вариантов.

Выполненный сравнительный анализ комбайнов для тонких пластов и систем их перемещения с использованием предложенных

критериев с учетом результатов работ [1,2] позволяют определить рациональную область применения комбайнов с различными типами механизма перемещения. В обобщенном виде результаты анализа приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Результаты сравнительного анализа систем перемещения очистных комбайнов для выемки тонких пластов

Критерии	Комбайны с ВСП	Комбайны с БСП
Критерии энерговооруженности [1]	+	+
Габаритные критерии [2] $L_{но}$, H_k $L_{п}$	+	—
Массовый критерий $m_{дв}$	— (особенно в длинных лавах)	+
КПД тягового органа	— (особенно в длинных лавах наклонных пластов с неспокойной гипсометрией)	+
Динамичность нагрузок и ресурс привода и подвески исполнительных органов	—	+
Динамичность нагрузок и ресурс привода механизма перемещения и тягового органа	+	—
Достижимые тягово-скоростные характеристики	+	+
Безопасность эксплуатации	— (особенно на пластах с углом падения $> 9^\circ$)	+
Удобство технического обслуживания и ремонта	+	—
Стоимость механизма перемещения и тягового органа	+	—

В таблице 3 знак «—» означает, что по данному критерию рассматриваемая система перемещения уступает альтернативной системе

ме. Знак «+» указує на те, що по розглянутому критерію система конкурентоспроможна.

Аналізуючи приведені в таблиці 3 якісні порівняльні характеристики систем переміщення, а також приведені вище кількісні дані можна сформулювати висновок про раціональну область застосування різних систем переміщення комбайнів для виїмки тонких пластів.

Висновки. Комбайни з вбудованими системами переміщення і жорстким тяговим органом мають переваги перед комбайнами з ВСП по всім основним критеріям порівняння, за винятком динамічної навантаженості приводу механізму переміщення, вартості (перш за все тягового органу) і зручності технічного обслуговування.

Особливо помітно ці переваги проявляються при роботі в лавах довжиною більше 200 м на нахилних пластах з нерівномірним заляганням при твердих і в'язких углях і руйнуванні пластів складної структури при роботі з присечкою породи ґрунту або кровлі. В таких умовах комбайни з ВСП мають великі втрати тягового зусилля на переміщення ланки, велику масу рухомих частин, вимагають використання захисної лебідки, мають порівняльно високий рівень динамічної навантаженості силових підсистем (крім підсистеми механізму переміщення) і, внаслідок цього, відносно низькі показники надійності цих підсистем. В той же час, динамічна навантаженість підсистеми переміщення в разі використання ВСП нижче, ніж при використанні жорсткого тягового органу, що в поєднанні з зручністю технічного обслуговування і ремонту дозволяє зробити висновок про порівняльно більш високі потенційно досяжні показники надійності ВСП.

Таким чином, областю раціонального застосування комбайнів з ВСП є тонкі пологі пласти (кути падіння до 9°) рівномірного залягання при відсутності породних прослойок і присечки твердих породи кровлі і ґрунту. В цьому разі можлива ефективна робота комбайна в лавах довжиною до 300 м і досягнення високих показників безвідмовності і ресурсу механізму переміщення.

Список літератури

1. Кондрахін В.П. Аналіз компоновочних схем комбайнів для виїмки тонких пластів по критеріям енерговооруженості / В.П. Кондрахін, В.В. Косарев, Н.І. Стадник // Наукові праці ДонНТУ: Серія: Гірничо-електромеханічна. Зб. наук. праць. – 2011. – Вип. 21(189). – С. 76-84.

2. Кондрахин В.П. Анализ компоновочных схем комбайнов для выемки тонких пластов по массовогабаритным критериям / В.П. Кондрахин, Н.И. Стадник // Наукові праці ДонНТУ: Серія: Гірничо-електромеханічна. Зб. наук. праць. – 2011. – Вип. 22(195). – С. 106-115.
3. Кондрахин В.П. Имитационная математическая модель динамических процессов очистных комбайнов высокой энерговооруженности с вынесенной системой подачи / В.П. Кондрахин, В.Г. Гуляев, В.Л. Головин // Наукові праці ДонНТУ, Серія: Гірничо-електромеханічна. Зб. наук. праць. – 2006. – Вип. 113. – С. 123-130.
4. Установление коэффициентов продольной жесткости тягового органа на базе рейки ЭЙ-КОТРЭК / П.А. Горбатов, Н.М. Лысенко, Е.А. Воробьев [и др.] // Наукові праці ДонНТУ, Серія: Гірничо-електромеханічна. Зб. наук. праць. – 2008. – Вип. 142. – С. 67-77.
5. Кондрахин В.П. О характере нагрузки частотно-регулируемых приводов двухдвигательных механизмов перемещения очистных комбайнов / В.П. Кондрахин, Н.И. Стадник // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых (Journal of Mining Science). – 2012. – №3. – С. 113-124.

Стаття надійшла до редакції 17.09.2012

В.П.Кондрахін, М.І.Стадник, Донецький національний технічний університет

Порівняльний аналіз комбайнів для виїмки тонких пластів з винесеною і вбудованою системами переміщення

Розроблені критерії оцінки і виконаний аналіз очисних комбайнів для виїмки тонких пластів з винесеними і вбудованими системами переміщення. Встановлені сфери застосування комбайнів з вказаними компоновальними схемами.

Ключові слова: очисний комбайн, аналіз, компоновальні схеми, критерії, механізм переміщення

V. Kondrakhin, N. Stadnik. Donetsk National Technical University

A Comparative Analysis of Cutter Loaders for Thin Seams Mining with Remote and Built-in Haulage Systems.

We developed estimation criteria and performed an analysis of cutter loaders for thin seams mining with remote and built-in haulage systems.

Keywords: cutter loader, analysis, criteria, haulage unit.