

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ УГЛЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ ОРГАНОМ КОМБАЙНА С РЫЧАЖНО-ИМПУЛЬСНЫМ ПРИВОДОМ

Ю.Н. Линник¹, В.Ю. Линник¹

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

Аннотация: Выполнены исследования прерывистого процесса резания угля, характерного для угледобывающих комбайнов с рычажно-импульсным приводом (РИП). Исследования проводились на полноразмерном углецементном блоке, оборудованном комбайнами, отличающимися кинематическими схемами рычажно-импульсного привода и механизмами подачи. Сравнение производилось с данными, полученными при работе комбайна, оборудованного обычным приводом. В процессе исследований было установлено, что характер нагружения исполнительных органов комбайнов с РИП при резании угля имеет циклический характер с изменением нагруженности исполнительного органа от нуля до максимальных значений. Увеличение момента усилий резания от нулевых значений до максимальных вызывает снижение частоты вращения исполнительных органов от максимума на холостом ходу до нуля. Установлено также, что для комбайнов с РИП, не имеющих дифференциального механизма подачи, увеличение сопротивляемости угля резанию вызывает увеличение момента сил резания при сохранении неизменной толщины стружки. Напротив, в комбайнах с РИП, имеющих дифференциальный механизм подачи, с ростом сопротивляемости толщина стружки уменьшается при незначительном изменении момента сил резания. Эксперименты показали, что силовые и энергетические показатели процесса резания комбайнами с РИП практически такие же, как и при использовании комбайнов с обычным приводом. В процессе неравномерного движения исполнительного органа с РИП на него действует момент сил инерции, соразмерный с моментом сил резания в интервале времени ускоренного движения. При этом величина крутящего момента на валу привода исполнительного органа и элементах трансмиссии привода равна сумме моментов сил резания и сил инерции.

Ключевые слова: угольный блок, прерывистое и непрерывное резание, рычажно-импульсный привод, сила резания, энергоемкость резания, толщина стружки, сопротивляемость резанию, момент сил резания, частота вращения, кинематическая схема.

Для цитирования: Линник Ю. Н., Линник В. Ю. Исследование процесса разрушения угля исполнительным органом комбайна с рычажно-импульсным приводом // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 7. – С. 78–90. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_7_0_78.

Coal cutting by cutter heads with lever-and-impulse drives

Yu.N. Linnik¹, V.Yu. Linnik¹

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

Abstract: Discontinuous coal cutting process typical of coal cutter-loaders with lever-and-impulse drives (LID) is investigated. The research was carried out in a full-scale coal and cement block equipped with coal cutting machines with different circuitries of lever-and-impulse drives and advance mechanisms. The comparison included data on operation of a coal cutter-loader with a conventional drive. The research finds out that loading of cutter heads on the cutter-loaders with the lever-and-impulse drives is cyclical and changes from zero to maximal values. The increase in the cutting force moment from zero to a maximum causes the decrease in the rate speed of the cutter head from a maximum in noncutting to zero. Furthermore, it is found that for the cutting machines with the lever-and-impulse drives without a differential advance mechanism, the increase in the coal cuttability increases the cutting force moment at the same depth of cut. Vice versa, in the cutting machines with the lever-and-impulse drives with a differential advance mechanism, with the increasing cuttability, the depth of cut decreases at a slight change in the moment of the cutting forces. The tests show that the force and energy data of the cutting process of the machines with the lever-and-impulse drives are the same as in the excavators with the conventional drives. During uneven motion of the cutter head with the lever-and-impulse drive, the cutter head experiences the inertia moment comparable with the cutting force moment in the interval of time of accelerated motion. In this case, the value of the torque on the cutter head drive shaft and in the drive transmission is equal to the sum of the cutting force and inertia moments.

Key words: coal block, continuous and discontinuous cutting, lever-and-impulse drive, cutting force, cutting energy intensity, depth of cut, cuttability, cutting force moment, rate speed, kinematic diagram.

For citation: Linnik Yu. N., Linnik V. Yu. Coal cutting by cutter heads with lever-and-impulse drives. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(7):78-90. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_7_0_78.

Введение

Решение проблемы безлюдной выемки угольных пластов в подземных условиях шахт возможно только при создании эффективных, высоконадежных в эксплуатации и по возможности простых в конструктивном исполнении горных машин с автоматическим регулированием режима их работы. Исследования, посвященные проблематике безлюдной выемки угля, достаточно подробно освещены в отечественной научной литературе [1–5]. При создании выемочных комбайнов, отвечающих таким требованиям, одним из возможных путей решения данной проблемы является использование в конструкциях машин рычажно-импульсного привода. Впервые такую возможность в своих исследованиях обосновал проф. Е.В. Александров [6], что позже было подтверждено другими российскими [7–9] и зарубежными [10–16] исследователями.

Методика исследований

Исследования проводились на полноразмерном углещементном блоке, установленном на сконструированных для проведения испытаний комплексах «КАМИ» и «Поиск» с рычажно-импульсными приводами (далее стенд «КАМИ» и стенд «Поиск»), различающиеся кинематическими схемами привода и механизмов подачи.

К особенностям конструкции стенда «КАМИ» относится то, что исполнительные органы комбайна имеют между собой кинематическую связь через синхронизирующие элементы, взаимодействующие с ведущими частями обгонных муфт этих исполнительных органов. Последнее позволяет перераспределять крутящий момент на выходных валах РИП пропорционально нагруженности исполнительных органов. Механизм подачи комбайна «КАМИ» представляет собой понижающий зубчатый редуктор от одного из двух исполнительных органов.

Стенд «Поиск» имеет дифференциальный механизм подачи комбайна, в состав которого входит равноплечий конический дифференциал, одно из ведущих звеньев которого приводится во вращение через зубчатую передачу от приводного электродвигателя, а другое — от вала исполнительного органа. Механизмы подачи обоих комбайнов выполнены бесцепными со звездочками подачи, взаимодействующими с зубчатой рейкой рештачного става полноразмерного углецементного блока.

В связи с тем, что режим работы комбайнов с РИП выбирается автоматически в зависимости от величины момента внешнего сопротивления на исполнительных органах, в процессе экспериментов производилось разрушение углецементных блоков, имеющих различные значения сопротивляемости резанию.

Изучение режимов работы комбайнов с РИП, сопровождающихся непрерывным регулированием скорости подачи от величины момента внешнего сопротивления, осуществлялось в процессе разрушения углецементных блоков косыми заездами. При этом ширина захвата плавно изменялась от нуля до конструктивной ширины захвата исполнительного органа.

Разрушение угля на стенде «Поиск» осуществлялось комбайном, оборудованным шнековыми исполнительными органами диаметром 800 мм, оснащенными радиальными резцами, установленными по последовательной схеме по два в линии резания с шагом 4,5 см. Ширина захвата составляла 0,5 м.

Комбайн стенда «КАМИ» был оборудован шнеками диаметром 1000 мм, оснащенными тангенциальными резцами с конической режущей частью, установленными по последовательной схеме по три в линии резания с шагом 5,0 см.

Результаты испытаний, полученные на стендах «Поиск» и «КАМИ», сравнивались с экспериментальными данными, полученными при работе серийного комбайна 2К52 с обычным приводом исполнительных органов, оснащенным электродвигателем с понижающей зубчатой передачей.

Нижней границей прочностных свойств углецементного блока была принята сопротивляемость резанию 130 Н/мм, а верхней — 220 Н/мм, что позволило охватить практически весь диапазон шахтопластов по сопротивляемости резанию.

Результаты исследований

Экспериментальные исследования силовых и энергетических параметров разрушения угля исполнительными органами комбайнов с РИП

В процессе исследований, проведенных на стендах «Поиск» и «КАМИ», установлено, что процесс нагружения исполнительных органов обоих комбайнов (рис. 1) имеет ярко выраженный циклический характер и включает в каждом цикле интервалы времени, в рамках которых имеет место:

- нарастание нагрузки от нуля до величины усилия резания;
- разрушение с нагрузками, определяемыми усилиями резания;

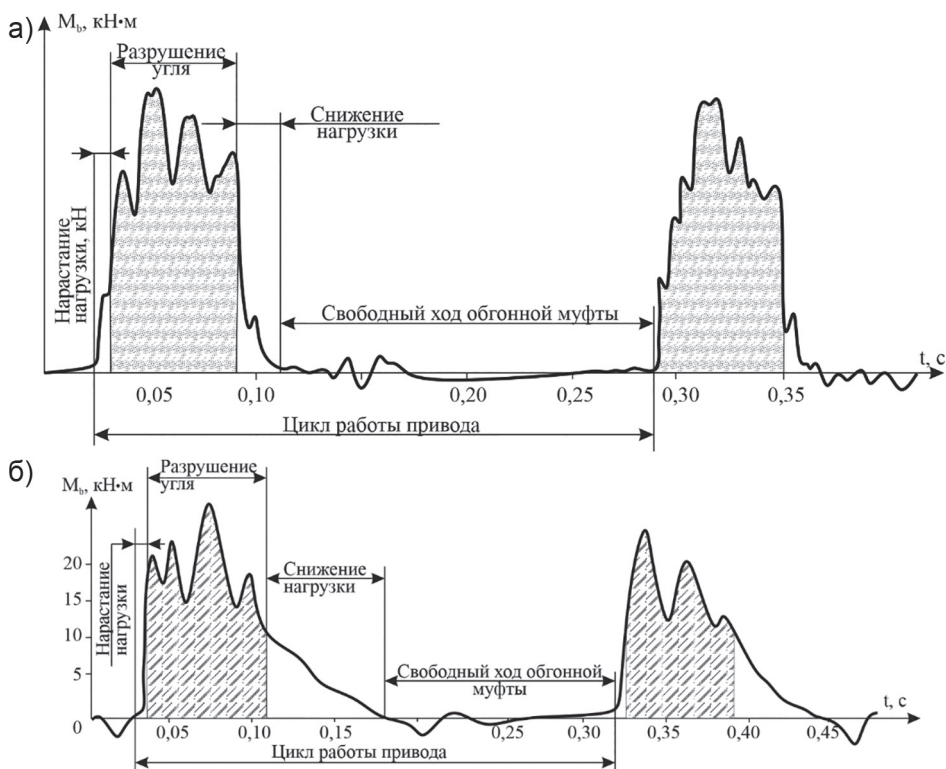


Рис. 1. Графики процесса нагружения исполнительных органов на стендах: «Поиск» (а); «КАМИ» (б)
 Fig. 1. Graphs of the loading process of the actuators on the stands: «Poisk» (a); «KAMI» (b)

- снижение нагрузок от величины усилий резания до нуля;
- свободный ход обгонной муфты;
- отрицательные значения крутящего момента на валу исполнительного органа, обусловленные неидеальностью характеристик обгонной муфты;
- влияние инерционности исполнительных органов на частоту их вращения и процесс формирования нагрузки на валу привода;
- влияние инерционности механизма подачи, приводящее в отдельных режимах работы комбайна к нарушению нормального режима стружкообразования на резах исполнительного органа.

Как известно [25], основными показателями, характеризующими процесс резания угля исполнительным органом, независимо от конструкции привода, яв-

ляются силовые и энергетические параметры [17], скорость подачи комбайна [18], толщина стружки [19, 20] и энергоёмкость резания [21, 22]. В таблице приведены результаты экспериментальных исследований этих показателей, выполненных на стендах «Поиск» и «КАМИ», в сравнении с комбайном 2К52. Экспериментальные данные, полученные на стенде «Поиск», показали, что в пределах исследованного диапазона сопротивляемости угля резанию с увеличением A наблюдается практически линейное уменьшение скорости подачи и, соответственно, толщины стружки, производительности комбайна и потребляемой мощности. При этом величина момента сил резания изменяется незначительно, а энергоёмкость процесса резания возрастает пропорционально снижению тол-

Сравнительные результаты исследований показателей процесса резания комбайнами, оснащенными приводами с РИП и обычным приводом
Comparative results of research of cutting process indicators of combines equipped with RIP and conventional drives

Сопротив- ляемость угля резанию А, Н/мм	Частота враще- ния шне- ка n, об/мин	Скорость подачи V _п , м/мин	Тол- щина стружки h, см	Момент сил реза- ния M _р , кН·м	Усилие подачи комбайна F _п , кН	Произ- водитель- ность комбайна Q, м ³ /ч	Мощ- ность на резание P, кВт	Энерго- емкость резания H _в , кВт·ч/м ³
Стенд с комбайном «Поиск»								
130	21,0	1,15	1,75	6,16	19,2	27,6	13,5	0,49
140	18,9	0,92	1,55	6,34	23,4	22,1	12,5	0,37
180	15,1	0,60	1,26	6,82	26,8	14,5	10,8	0,75
200	13,9	0,45	1,02	6,75	28,2	10,7	9,80	0,93
220	12,6	0,31	0,76	7,33	29,3	7,35	9,70	1,36
Стенд с комбайном «КАМИ»								
80	30,0	1,40	0,99	6,11	45,8	44,2	18,8	0,41
120	24,7	1,14	0,98	9,19	12,3	35,9	23,5	0,67
160	9,4	0,43	0,97	14,2	19,3	13,4	13,3	1,03
Комбайн 2К52								
153	40	1,31	1,05	7,62	27,0	49,6	31,9	0,64
140	40	1,69	1,35	8,51	21,2	64,1	36,1	0,55
140	40	1,78	1,40	8,57	24,2	67,1	35,9	0,53
153	40	2,05	1,64	10,70	34,6	77,7	45,1	0,57

щины стружки. Таким образом, предположения о возможности экстремального регулирования с поддержанием постоянства момента резания и мощности, расходуемой на резание, подтвердилось лишь частично.

Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о том, что процесс разрушения угля комбайнами с РИП сопровождается значительно большими, чем у комбайна 2К52 с обычным приводом, колебаниями частот вращения исполнительных органов, крутящего момента, колебаниями усилия и скорости подачи, потребляемой мощности. Анализ коэффициентов вариации по данным параметрам указал на высокие их значения (от 1,2 до 4,5 — для крутящего момента; 1,3—2,5 — для частоты вра-

щения; 0,45—2,7 — для усилия подачи; 0,8—2,0 — для скорости подачи), что является особенностями, присущими используемому в комбайнах с РИП приводу, вызванными циклическим характером работы рычажно-импульсного привода.

Исследование влияния силовых показателей процесса резания на частоту вращения исполнительного органа

Изменение в широких пределах частот вращения исполнительных органов в зависимости от величины моментов внешнего сопротивления, действующих на них, является, как отмечено выше, неотъемлемым свойством комбайнов с рычажно-импульсным приводом. Исследования показали, что расчетные зависи-

мости частоты вращения исполнительных органов таких комбайнов неточно отражают характер влияния на них момента внешнего сопротивления. Установлено, что на частоту вращения исполнительного органа оказывает влияние не только величина суммарного по двум исполнительным органам момента внешнего сопротивления, но и соотношение величин суммарного момента с величиной момента на данном исполнительном органе.

Анализ кинематической схемы комбайна «КАМИ» показал, что это происходит потому, что кинематическая связь исполнительных органов синхронизирует движение ведущих частей их обгонных муфт, а ведомые части, непосредственно связанные с исполнительными органами, оказываются не взаимодействующими между собой в интервале времени свободного хода обгонной муфты.

Зависимости, характеризующие соотношение моментов внешнего сопротивления на исполнительных органах, определяемые главным образом момен-

тами усилий резания, и частот их вращения, имеют следующий вид:

$$\begin{cases} n_{оп} = f'(M_{оп}, M_{от}), \\ n_{от} = f''(M_{оп}, M_{от}), \end{cases} \quad (1)$$

где $M_{оп}$, $M_{от}$ – моменты сил резания на опережающем и отстающем шнеках соответственно, кН·м; $n_{от}$, $n_{оп}$ – частоты вращения опережающего и отстающего шнеков, об/мин.

Данная зависимость отражает связь входных и выходных параметров процесса работы рычажно-импульсного привода в соответствии с принятой схемой процесса работы всего комбайна.

Графическое изображение зависимости (1), полученное экспериментально на стенде «КАМИ» (рис. 2), представляет собой изометрическое изображение поверхности, координаты точек которой являются значениями параметров режима работы РИП ($M_{оп}$, $M_{от}$, $n_{от}$, $n_{оп}$). Секущая поверхность, проведенная через точку, характеризующую, например, величину i -го момента сил резания на отстающем шнеке $M_{от,i}$, параллельно осям моментов сил резания и частоты вра-

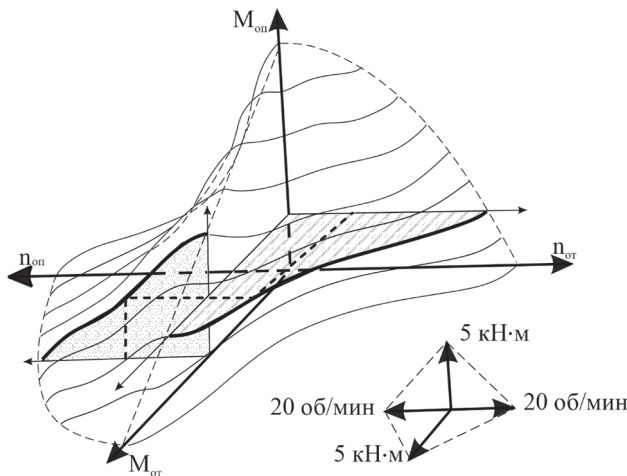


Рис. 2. Графическое изображение соотношений моментов внешнего сопротивления и частот вращения исполнительных органов комбайна «КАМИ»

Fig. 2. Graphical representation of relations of external co-moments and rotational speeds of the executive bodies of the combine harvester «КАМИ»

щения опережающего шнека ($M_{оп}$, $n_{оп}$) в сечении образует линию, описываемую зависимостью $n_{оп} = f(M_{оп})$ при $M_{от} = M_{от.г}$.

Изометрическое изображение зависимости (1) наглядно показывает, что вещественные значения частот вращения исполнительных органов существуют не для всех значений соотношений моментов резания на них. В частности, должно удовлетворяться условие $M_{оп} + M_{от} \leq M_{max}$, где M_{max} — максимальное значение момента, развиваемого РИП.

Поскольку изометрическое изображение зависимости (1), приведенное на рис. 2, не может быть использовано в инженерных расчетах, а также учитывая то, что рассмотренный вид кинематической связи исполнительных органов комбайна «КАМИ» может быть использован во всех вновь создаваемых комбайнов с РИП, было найдено аппроксимирующее выражение зависимостей вида (1):

$$\begin{cases} n_{оп} = n_c \left(1 - 0,2 \frac{M_{от}}{M_{оп}} \right) \\ n_{от} = \frac{[n_c (M_{оп} + M_{от}) - M_{оп} n_{оп}]}{M_{от}} \end{cases}, \quad \text{об/мин,} \quad (2)$$

где:

$$n_c = n_{max} - (n_{max} - n_{ном}) \frac{(M_{оп} + M_{от})}{M_{ном}}, \quad \text{об/мин, при } (M_{оп} + M_{от}) < M_{ном} \quad (3)$$

$$n_c = n_{ном} - \frac{M_{max} - (M_{оп} + M_{от})}{M_{max} - M_{ном}}, \quad \text{об/мин, при } (M_{оп} + M_{от}) > M_{ном}. \quad (4)$$

Величины, входящие в уравнения (2)–(4), имеют следующие значения: n_{max} — максимальная частота вращения исполнительного органа без нагрузки,

об/мин; $n_{ном}$ (об/мин) и $M_{ном}$ (кН·м) — соответственно номинальные значения частоты вращения и крутящего момента, соответствующие режиму максимальной мощности, развиваемой РИП.

Величины n_{max} , M_{max} , $n_{ном}$, $M_{ном}$, являющиеся по существу основными параметрами комбайнов с РИП, могут быть сравнительно просто определены как экспериментально, так и расчетным путем [23, 24].

Из рис. 2 и выражений (2)–(4) следует, что частота вращения более нагруженного исполнительного органа меньше, чем менее нагруженного. При этом возможны два случая:

- снижение частоты вращения исполнительного органа, кинематически связанного с механизмом подачи, благодаря наличию кинематической связи не вызывает изменения на нем параметров стружкообразования. Таким исполнительным органом обычно является опережающий, как наиболее нагруженный. На менее нагруженном отстающем исполнительном органе частота вращения возрастает, что сопровождается уменьшением толщины стружки и снижением момента сил резания;

- наиболее нагруженным является исполнительный орган, кинематически не связанный с механизмом подачи. При этом скорость подачи задается менее нагруженным отстающим исполнительным органом, при резании которым параметры стружкообразования поддерживаются постоянными. Вследствие того, что на опережающем исполнительном органе частота вращения меньше, чем на отстающем, толщина стружки на нем возрастает, вызывая дополнительное увеличение момента сил резания и снижение частоты вращения. При этом работа комбайна становится неустойчивой и возможна полная его остановка с прекращением процесса разрушения, когда фактические значения толщины стружки

превысят его предельно допустимые значения.

Таким образом, для комбайнов с РИП характерным является снижение частоты вращения наиболее нагруженного исполнительного органа и, при наличии кинематической связи, менее нагруженного исполнительного органа с механизмом подачи. В этой связи для комбайнов с РИП следует использовать в качестве опережающего исполнительный орган, связанный кинематически с механизмом подачи. При проектировании комбайнов, работающих по челноковой схеме, необходимо предусматривать возможность переключения механизма подачи к наиболее нагруженному исполнительному органу.

Исследование влияния инерционных сил на нагруженность исполнительных органов

Как было показано выше (см. рис. 1), в процессе прерывистого разрушения угля частота вращения исполнительного органа комбайна с РИП в каждом цикле работы привода изменяется в диапазоне от нуля до максимума. При этом часть времени при разрушении пласта исполнительный орган движется с ускорением, а привод совершает не только работу по разрушению угля, но и работу, направленную на увеличение кинетической энергии движущегося исполнительного органа.

Величина крутящего момента M_b , действующего на исполнительный орган, может быть описана формулой

$$M_b = M_p + J \cdot d_n/d_t, \text{ кН}\cdot\text{м}, \quad (5)$$

где J — момент инерции исполнительного органа, $\text{кН}\cdot\text{м}/\text{с}^{-2}$; d_n/d_t — угловое ускорение исполнительного органа, с^{-2} ; M_p — момент сил резания на исполнительном органе, $\text{кН}\cdot\text{м}$.

Поскольку процесс разрушения угля в каждом цикле работы комбайна с РИП

начинается и заканчивается при нулевой частоте вращения исполнительного органа, величина его углового ускорения d_n/d_t за этот интервал времени равна нулю. Однако в интервале времени, когда $d_n/d_t > 0$, инерционная составляющая нагрузки складывается с моментом сил резания. При этом суммарная величина нагрузки имеет величину, превышающую значение момента сил резания. Несмотря на то, что инерционность исполнительного органа не оказывает влияния на силовые и энергетические параметры процесса резания угля (работа сил инерции за период цикла работы РИП равна нулю), учитывать ее необходимо при определении надежности элементов трансмиссии привода. Было установлено, что при разрушении угля комбайнами «Поиск» и «КАМИ» инерционная составляющая нагрузки по абсолютной величине соизмерима с величиной момента сил резания.

Для инженерных расчетов практический интерес представляет величина возникающих максимальных значений суммарной нагрузки $M_{b,\text{max}}$ на валу привода исполнительного органа. Экспериментально установлено, что при работе комбайна величина $M_{b,\text{max}}$ однозначно определяется моментом сил резания.

Процесс формирования максимальных нагрузок на валу привода происходит следующим образом.

1. При значениях момента сил резания близких к нулю колебания частоты вращения исполнительного органа уменьшаются за счет его инерционности. Двигающийся по инерции исполнительный орган лишь незначительную часть времени цикла взаимодействует через обгонную муфту с приводом. То есть интервал времени, за который происходит накопление кинетической энергии исполнительным органом, значительно меньше интервала времени, за который она расходуется. А поскольку величины

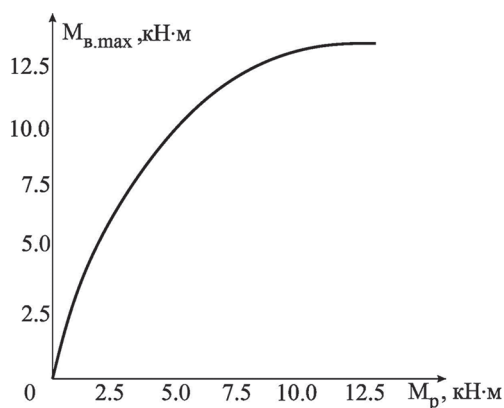


Рис. 3. Зависимость максимального крутящего момента $M_{в.мах}$ на валу привода исполнительного органа комбайна «КАМИ» от момента сил резания M_p

Fig. 3. Dependence of the maximum torque $M_{в.мах}$ on the shaft of the drive of the «КАМИ» combine harvester's actuator on the torque of cutting forces M_p

запасенной и расходуемой за один цикл кинетической энергии равны между собой, величина момента на валу привода исполнительного органа в интервал времени накопления кинетической энергии значительно превосходит величину момента внешнего сопротивления в интервале времени, за который она расходуется. Экспериментально установлено, что в таком режиме работы комбайна с РИП величина $M_{в.мах}$ в 5–7 раз превышает величину момента сил резания M_p .

2. При значениях M_p близких к величине номинального момента $M_{ном}$, развиваемого РИП, величина максимального момента на валу привода исполнительного органа приближается к величине момента, развиваемого приводом при максимально возможных деформациях упругих элементов. То есть величина инерционных нагрузок на исполнительных органах, по существу, ограничивается способностью привода к перегрузкам. Экспериментально установлено, что $M_{в.мах} = (1,5 \dots 2,0) M_p$.

3. При разрушении угля с моментами сил резания по величине близкими к величине максимального момента, развиваемого РИП, уровень максимальных

нагрузок на валу исполнительного органа ограничивается защитными свойствами самого привода. Скорость резания, возникающие ускорения и инерционная составляющая нагрузки стремится к нулю.

Рассмотренные закономерности процесса формирования максимальных нагрузок на валу привода исполнительного органа могут быть описаны графиком зависимости, приведенной на рис. 3, и выражением

$$\begin{cases} M_{в.мах} = M_{мах} - M_{мах} \left(1 - \frac{M_p}{M_{мах}} \right)^3, \\ \text{при } M_p \leq M_{мах}; \\ M_{в.мах} = M_{мах}, \text{ при } M_p > M_{мах} \end{cases} \quad (6)$$

где $M_{мах}$ — максимальный момент, развиваемый РИП, кН·м.

Анализ рис. 3 и выражения (6) показывает, что по мере увеличения момента сил резания M_p уровень максимальных нагрузок на исполнительных органах комбайна с РИП асимметрически приближается к величине максимального значения, развиваемого приводом. Эта особенность отражает защитные свойства трансмиссии комбайнов, оснащен-

ных рычажно-импульсным приводом. При этом следует иметь в виду, что несмотря на то, что уровень максимальных нагрузок на валу исполнительного органа и в элементах трансмиссии ограничен и не может быть выше определенных значений, в расчетах надежности последних следует учитывать усталостные напряжения при циклическом нагружении.

Выводы

1. Процесс нагружения исполнительных органов комбайна с РИП при резании угля имеет циклический характер, в пределах каждого цикла нагруженность исполнительного органа имеет разные по величине значения и изменяется от нуля до максимальных значений.

2. Увеличение момента усилий резания от нулевых значений до максимальных M_{\max} , развиваемых рычажно-импульсным приводом, вызывает снижение частоты вращения исполнительных органов от максимума на холостом ходу до нуля при M_{\max} .

3. Для комбайнов с РИП, не имеющих дифференциального механизма подачи («КАМИ»), увеличение сопротивляемости угля резанию вызывает увеличение момента сил резания при сохранении неизменной толщины стружки. Напротив, в комбайнах с РИП, имеющих дифференциальный механизм подачи («Поиск»), увеличение сопротивляемости угля резанию вызывает уменьшение толщины стружки при незначительном увеличении момента сил резания.

4. Силовые и энергетические показатели процесса резания комбайнами с РИП практически такие же, как и при работе комбайнов с обычным приводом.

5. В процессе неравномерного движения исполнительного органа комбайна с РИП на него действует момент сил инерции, соразмерный с моментом сил резания. В интервале времени ускоренного движения величина крутящего момента на валу привода исполнительного органа и элементах трансмиссии привода равна сумме моментов сил резания и сил инерции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукьяненко В. А. Способ безлюдной выемки полезных ископаемых // Уголь. – 2019. № 2. С. 37 – 39. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-2-37-39.

2. Плакиткина Л. С., Плакиткин Ю. А., Дьяченко К. И. Оценка производственного потенциала отечественных машиностроительных предприятий для реализации программы импортозамещения в угольной отрасли // Уголь. – 2021. – № 1 (1138). – С. 34 – 42. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-1-34-42.

3. Разовский Ю. В., Артемьев Н. В., Киселева С. П., Савельева Е. Ю., Рудницкий В. С. О формировании сверхприбыли в цифровой экономике // Уголь. – 2021. – № 4. – С. 37 – 39. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-4-37-39.

4. Захаров В. Н., Кубрин С. С. Цифровая трансформация и интеллектуализация горнотехнических систем // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 5-2. – С. 31 – 47. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_31.

5. Наговицын О. В., Возняк М. Г. К вопросам управления роботизированным горнодобывающим предприятием // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5-1. – С. 326 – 335. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_326.

6. Александров Е. В., Александров В. Е., Валдаев А. П., Александров В. Е. Авторское свидетельство СССР № 599122. Импульсный привод. 1978. Бюл. № 11.

7. Устюжанин С. В. Исследование силовых и энергетических параметров процесса резания угля применительно к комбайнам с рычажно-импульсным приводом / Научные сообщения Ин-

ститута горного дела им. А.А. Скочинского. Механизация и автоматизация подземной добычи угля: сборник научных статей. Вып. 218. — М., 1983. — С. 81 — 88.

8. Позин Е. З., Меламед В. З., Тон В. В. Разрушение углей выемочными машинами / Под общей ред. Е.З. Позина. — М.: Недра, 1984. — 288 с.

9. Линник Ю. Н., Линник В. Ю. Разрушение угольных пластов при добыче выемочными машинами. — М.: ИНФРА-М, 2022. — 356 с.

10. Wang G., Jiao S., Cheng G. Fully mechanized coal mining technology for thin coal seam under complicated geological conditions // *Energy Exploration & Exploitation*. 2011, vol. 29, no. 2, pp. 169 — 177.

11. Xiang Cheng, Guangming Zhao, Yingming Li, Xiangrui Meng, Qingyi Tu Key technologies and engineering practices for soft-rock protective seam mining // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020, vol. 30, no. 6, pp. 889 — 899. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.07.006.

12. Liqing Sun, Xiaodi Zhang, Qingliang Zeng, Kuidong Gao, Kao Jiang, Jiawei Zhou Application of a screw conveyor with axial tilt blades on a shearer drum and investigation of conveying performance based on DEM // *Particuology*. 2022, vol. 61, pp. 91 — 102. DOI: 10.1016/j.partic.2021.06.001.

13. Xin Wang, Yangxi Bai, Xianfeng Zou, Xinwei Yang, Hongyan Chen, Hongyue Chen Research on indirect measurement and estimation method of shearer drum cutting load // *Alexandria Engineering Journal*. 2023, vol. 65, pp. 939 — 949. DOI: 10.1016/j.aej.2022.10.002.

14. Li Xiao-Huo, Li Ting, Jiao Li, Xu Guang-Ming, Yang Ting-Ting Development of cutting load simulation system and its simulation study on drum shearer // *Journal of China Coal Society*. 2016, vol. 41, no. 2, pp. 502 — 506. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.0430.

15. Wang Li-Ping, Jiang Bin-Song, Zhang Qiang Calculation of peak cutting force of conical picks under conditions of dissymmetrical slotting // *Journal of China Coal Society*. 2016, vol. 41, no. 11, pp. 2876 — 2882. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0900.

16. Linlin Wang, Dekun Zhang, Dagang Wang, Cunao Feng A review of selected solutions on the evaluation of coal-rock cutting performances of shearer picks under complex geological conditions // *Applied Sciences*. 2022, vol. 12, no. 23, article 12371. DOI: 10.3390/app122312371.

17. Jinxia L., Chao M., Qingliang Z., Kuidong G. Discrete element simulation of conical pick's coal cutting process under different cutting parameters // *Hindawi Shock and Vibration*. — 2018, vol. 4. DOI: 10.1155/2018/7975141.

18. Xueyi Li, Binbing Huang, Guoying Ma, Qingliang Zeng Study on roadheader cutting load at different properties of coal and rock // *The Scientific World Journal*. 2013. DOI: 10.1155/2013/624512.

19. Nguyen V. X., Nguyen K. L., Gabov V. V., Lykov Y. V. Relocation schemes of picks with cutting, coupling and group cuts on shearer cutting drums // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 378, no. 1, article 012025. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012025.


20. Шабаев О. Е., Зинченко П. П., Мезников А. В. Экспериментальные исследования влияния ширины захвата шнекового исполнительного органа комбайна на эффективность процесса погрузки // *Горные науки и технологии*. — 2019. — Т. 4. — № 2. — С. 90 — 102. DOI: 10.17073/2500-0632-2019-2-90-102.

21. Позин Е. З., Меламед В. З., Азовцева С. М. Измельчение углей при резании. — М.: Наука, 1977. — 138 с.

22. Yaneng Zhou, Wu Zhang, Isaac Gamwo, Jeen-Shang Lin Mechanical specific energy versus depth of cut in rock cutting and drilling // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2017, vol. 100, pp. 287 — 297. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2017.11.004.

23. Александров В. Е., Левинц Г. М. Математическая модель комбайна с рычажно-импульсным приводом / Научные сообщения Института горного дела им. А.А. Скочинского. Создание и повышение надежности горно-шахтного оборудования: сборник научных статей. Вып. 220. — М., 1983. — С. 29 — 36.

24. Чернова Л. Н. Исследование на ЭВМ динамики рабочего режима комбайна с рычажно-импульсным приводом (РИП) / Научные сообщения Института горного дела им. А.А. Скочинского. Техническое обслуживание и повышение эффективности применения горных машин: сборник научных статей. Вып. 237. — М., 1985. — С. 88 — 93.

25. ОСТ 12.44.258-84. Комбайны очистные. Выбор параметров и расчет сил резания и подачи на исполнительных органах. Методика. — М.: Изд. Министерства угольной промышленности СССР, 1985. — 108 с. 

REFERENCES

1. Lukyanenko V. A. The method of unpopulated extraction of minerals. *Ugol'*. 2019, no. 2, pp. 37 – 39. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-2-37-39.
2. Plakitkina L. S., Plakitkin Yu. A., Dyachenko K. I. Assessment of the production potential of domestic machine-building companies for implementation of the import substitution program in the coal industry. *Ugol'*. 2021, no. 1 (1138), pp. 34 – 42. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-1-34-42.
3. Razovskiy Y. V., Artemiev N. V., Kiseleva S. P., Saveleva E. Y., Rudnitskiy V. S. On the formation of superprofits in the digital economy. *Ugol'*. 2021, no. 4, pp. 37 – 39. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-4-37-39.
4. Zakharov V. N., Kubrin S. S. Digital transformation and intellectualization of mining systems. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 5-2, pp. 31 – 47. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_31.
5. Nagovitsyn O. V., Voznyak M. G. Robotic mine management. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 5-1, pp. 326 – 335. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_326.
6. Aleksandrov E. V., Aleksandrov V. E., Valdaev A. P., Aleksandrov V. E. *USSR Copyright Certificate No. 599122*, 1978. [In Russ].
7. Ustyuzhanin S. V. Investigation of force and energy parameters of coal cutting process as applied to combines with lever-pulse drive. *Nauchnye soobshcheniya Instituta gornogo dela im. A.A. Skochinskogo. Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya podzemnoy dobychi uglya: sbornik nauchnykh statey. Vyp. 218* [Scientific reports of the A.A. Skochinsky Institute of Mining. Mechanization and automation of underground coal mining: a collection of scientific articles. Issue 218], Moscow, 1983, pp. 81 – 88. [In Russ].
8. Pozin E. Z., Melamed V. Z., Ton V. V. *Razrushenie ugley vyemochnymi mashinami* [Coal cutting by winning machines], Moscow, Nedra, 1984, 288 p.
9. Linnik Yu. N., Linnik V. Yu. *Razrushenie ugol'nykh plastov pri dobyche vyemochnymi mashinami* [Destruction of coal seams by mining machines], Moscow, INFRA-M, 2022, 356 p.
10. Wang G., Jiao S., Cheng G. Fully mechanized coal mining technology for thin coal seam under complicated geological conditions. *Energy Exploration & Exploitation*. 2011, vol. 29, no. 2, pp. 169 – 177.
11. Xiang Cheng, Guangming Zhao, Yingming Li, Xiangrui Meng, Qingyi Tu Key technologies and engineering practices for soft-rock protective seam mining. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020, vol. 30, no. 6, pp. 889 – 899. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.07.006.
12. Liqing Sun, Xiaodi Zhang, Qingliang Zeng, Kuidong Gao, Kao Jiang, Jiawei Zhou Application of a screw conveyor with axial tilt blades on a shearer drum and investigation of conveying performance based on DEM. *Particuology*. 2022, vol. 61, pp. 91 – 102. DOI: 10.1016/j.partic.2021.06.001.
13. Xin Wang, Yangxi Bai, Xianfeng Zou, Xinwei Yang, Hongyan Chen, Hongyue Chen Research on indirect measurement and estimation method of shearer drum cutting load. *Alexandria Engineering Journal*. 2023, vol. 65, pp. 939 – 949. DOI: 10.1016/j.aej.2022.10.002.
14. Li Xiao-Huo, Li Ting, Jiao Li, Xu Guang-Ming, Yang Ting-Ting Development of cutting load simulation system and its simulation study on drum shearer. *Journal of China Coal Society*. 2016, vol. 41, no. 2, pp. 502 – 506. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.0430.
15. Wang Li-Ping, Jiang Bin-Song, Zhang Qiang Calculation of peak cutting force of conical picks under conditions of dissymmetrical slotting. *Journal of China Coal Society*. 2016, vol. 41, no. 11, pp. 2876 – 2882. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0900.
16. Linlin Wang, Dekun Zhang, Dagang Wang, Cunao Feng A review of selected solutions on the evaluation of coal-rock cutting performances of shearer picks under complex geological conditions. *Applied Sciences*. 2022, vol. 12, no. 23, article 12371. DOI: 10.3390/app122312371.
17. Jinxia L., Chao M., Qingliang Z., Kuidong G. Discrete element simulation of conical pick's coal cutting process under different cutting parameters. *Hindawi Shock and Vibration*. 2018, vol. 4. DOI: 10.1155/2018/7975141.
18. Xueyi Li, Binbing Huang, Guoying Ma, Qingliang Zeng Study on roadheader cutting load at different properties of coal and rock. *The Scientific World Journal*. 2013. DOI: 10.1155/2013/624512.
19. Nguyen V. X., Nguyen K. L., Gabov V. V., Lykov Y. V. Relocation schemes of picks with cutting, coupling and group cuts on shearer cutting drums. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 378, no. 1, article 012025. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012025.

20. Shabaev O. E., Zinchenko P. P., Meznikov A. V. Experimental studies of the influence of the working width of the auger executive body of the combine harvester on the efficiency of the loading process. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2019, vol. 4, no. 2, pp. 90–102. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2019-2-90-102.

21. Pozin E. Z., Melamed V. Z., Azovtseva S. M. *Izmel'chenie ugley pri rezanii* [Grinding of coals by cutting], Moscow, Nauka, 1977, 138 p.

22. Yaneng Zhou, Wu Zhang, Isaac Gamwo, Jeen-Shang Lin Mechanical specific energy versus depth of cut in rock cutting and drilling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2017, vol. 100, pp. 287–297. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2017.11.004.

23. Aleksandrov V. E., Levinz G. M. Mathematical model of a combine harvester with a lever-pulse drive. *Nauchnye soobshcheniya Instituta gornogo dela im. A.A. Skochinskogo. Sozdanie i povyshenie nadezhnosti gorno-shakhtnogo oborudovaniya: sbornik nauchnykh statey*. Vyp. 220 [Scientific reports of the A.A. Skochinsky Institute of Mining. Creation and improvement of reliability of mining equipment: a collection of scientific articles. Issue 220], Moscow, 1983, pp. 29–36. [In Russ].

24. Chernova L. N. Study on the computer of the dynamics of the operating mode of a combine harvester with a lever-pulse drive (RIP). *Nauchnye soobshcheniya Instituta gornogo dela im. A.A. Skochinskogo. Tekhnicheskoe obsluzhivanie i povyshenie effektivnosti primeneniya gornykh mashin: sbornik nauchnykh statey*. Vyp. 237 [Scientific reports of the A.A. Skochinsky Institute of Mining. Maintenance and improvement of the efficiency of mining machines: a collection of scientific articles. Issue 237], Moscow, 1985, pp. 88–93. [In Russ].

25. OST 12.44.258-84. *Kombayny ochistnye. Vybor parametrov i raschet sil rezaniya i podachi na ispolnitel'nykh organakh*. Metodika [Industry standards 12.44.258-84. Combine harvesters. Selection of parameters and calculation of cutting and feeding forces on the executive bodies. Methodology], Moscow, 1985, 108 p. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Линник Владимир Юрьевич¹ — д-р экон. наук, доцент, профессор, e-mail: vy_linnik@guu.ru,

¹ Государственный университет управления.

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

V.Yu. Linnik¹, Dr. Sci. (Econ.), Assistant Professor, Professor, e-mail: vy_linnik@guu.ru,

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

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

Получена редакцией 28.11.2023; получена после рецензии 30.01.2024; принята к печати 10.06.2024.

Received by the editors 28.11.2023; received after the review 30.01.2024; accepted for printing 10.06.2024.

