

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ УГЛЯ ОДИНОЧНЫМ РЕЗЦОМ 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). С этой целью был создан специальный стенд, представляющий собой динамическую модель рычажно-импульсного привода, позволивший осуществить прерывистый процесс резания угля с параметрами импульсов нагружения и стружкообразования, характерными для комбайнов с РИП. В качестве параметров импульсов прерывистого резания приняты длительность процесса резания и среднее значение скорости движения резца при резании за один импульс. В качестве параметров, характеризующих силовые и энергетические показатели процесса резания, приняты среднее по пути движения резца усилие резания и удельные энергозатраты на резание. Методами дисперсионного анализа подтверждена гипотеза о том, что отсутствуют значимые различия усилий резания и удельных энергозатрат по диапазонам параметров импульсов, что позволило сделать вывод о том, что параметры импульсов не влияют на силовые и энергетические показатели прерывистого резания. Для определения закономерностей влияния параметров стружкообразования и прочностных характеристик разрушаемого угля на силовые и энергетические показатели резания проведены сравнительные опыты по прерывистому и непрерывному процессам резания. Установлено, что силовые и энергетические показатели прерывистого процесса резания могут быть рассчитаны по тем же методикам, что и для непрерывного резания.

Ключевые слова: резание, угольный блок, прерывистое и непрерывное резание, рычажно-импульсный привод, импульс резания, сила резания, энергоемкость резания, стружкообразование, сопротивление резанию, толщина стружки, скорость резания.

Для цитирования: Линник Ю. Н., Линник В. Ю. Исследование силовых и энергетических параметров процесса резания угля одиночным резцом с рычажно-импульсным приводом // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 11. – С. 152–164. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_11_0_152.

Force and energy parameters of coal cutting by a single pick with lever-pulse drive

Yu.N. Linnik¹, V.Yu. Linnik¹

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

Abstract: The process of interrupted coal cutting, intrinsic to coal cutting machines with lever-pulse drive (LPD), is analyzed. To this effect, a special test bench was designed as a dynamic

model of a lever-pulse drive, which enabled interrupted cutting of coal at the load pulses and chip parameters typical of cutting machines with LPD. The parameters of interrupted cutting pulses are assumed to be the cutting process duration and the average advance speed of a cutting pick per one pulse. The characteristics of the force and energy indicators of cutting process are assumed to be the average cutting force on the way of the cutting pick and the energy input in cutting. The dispersion analysis proved the hypothesis of the absence of significant cutting forces and specific energy inputs in the ranges of the pulse parameters, which allowed conclusion that the pulse parameters had no influence on the force and energy characteristics of the interrupted cutting process. The patterns of influence exerted by the chip formation characteristics and strength properties of coal on the force and energy indicators of cutting were determined from the comparative tests of the interrupted and continuous cutting processes. It is found that calculation of the force and energy indicators of the interrupted cutting process can use the same procedures as in case of continuous cutting.

Key words: cutting, coal block, interrupted and continuous cutting, lever-pulse drive, cutting pulse, cutting force, cutting energy content, chip formation, cutting resistance, depth of cut, cutting speed.

For citation: Linnik Yu. N., Linnik V. Yu. Force and energy parameters of coal cutting by a single pick with lever-pulse drive. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(11):152-164. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_11_0_152.

Введение

Одной из актуальных задач при решении проблемы безлюдной выемки угольных пластов в подземных условиях шахт является создание эффективных, высоконадежных в эксплуатации и по возможности простых по конструкции горных машин с автоматическим регулированием режима их работы. Российские ученые достаточно подробно освещают проблематику безлюдной выемки угля в отечественной научной литературе [1–5]. При создании выемочных комбайнов, отвечающих таким требованиям, одним из возможных путей решения данной задачи является использование в конструкциях машин рычажно-импульсного привода. Впервые такую возможность в своих исследованиях обосновал проф. Е.В. Александров [6]. Результаты зарубежных исследований по данной тематике отражены в [7–13].

При создании выемочных комбайнов с РИП предполагалось, что, по сравнению с обычными комбайнами, оборудован-

ными приводами исполнительных органов в виде электродвигателя с понижающим зубчатым редуктором, первые будут иметь следующие преимущества:

- обеспечивать автоматическое регулирование режима работы комбайна в зависимости от характеристик разрушаемости угольного массива, что особенно важно при выемке пластов сложного строения, содержащих крепкие неоднородности (породные прослойки и крупные твердые включения);
- обеспечивать эффективную защиту электродвигателя и всей трансмиссии комбайна от перегрузок;
- снижать энергоемкость разрушения угольного массива и улучшать сортность добываемого угля за счет импульсного характера работы привода.

В связи с вышеизложенным был выполнен комплекс работ, направленных на исследование силовых и энергетических показателей процесса разрушения угля исполнительным органом с рычажно-импульсным приводом.

Основная часть

Ниже приводятся результаты исследований влияния параметров импульсов нагружения на силовые и энергетические параметры процесса резания угля. Испытания проводились на стенде, представляющем собой динамическую модель РИП.

Кинематическая схема стенда (рис. 1) состоит из: возбудителя механических колебаний; упругого элемента, выполненного в виде цилиндрической пружины; обгонной муфты, смоделированной в стенде гибким нерастяжимым элементом; исполнительного органа, оснащенного режущим инструментом.

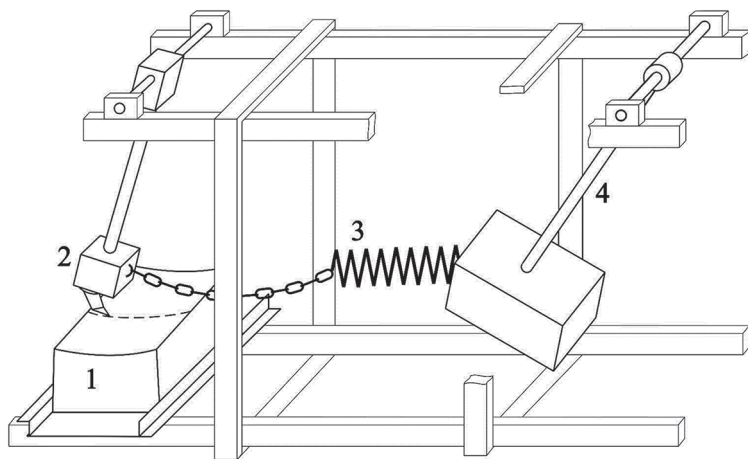
Регулирование амплитуды и длительности механических колебаний осуществлялось изменением массы и высоты подъема маятника возбудителя механических колебаний. Резец исполнительного органа стенда устанавливался в динамометр, который одновременно с регистрацией усилий при резании выполнял функцию резцедержателя. Разрушаемый углецементный блок уста-

навливался на стенде в подвижных направляющих, перемещением которых задавались необходимые параметры стружкообразования.

Измерительная система стенда кроме сигналов, поступающих из динамометра (силы резания), регистрировала также сигналы датчика перемещения, сигналы усилия, действующего на исполнительный орган со стороны привода, а также сигналы датчика положения маятника возбудителя колебаний.

Исследование влияния параметров импульсов нагружения на силовые и энергетические показатели процесса резания

Прерывистый процесс разрушения угля исполнительным органом комбайна с рычажно-импульсным приводом осуществляется под действием циклически повторяющихся импульсов. Поскольку каждый цикл нагружения включает интервалы времени, когда нагрузка отсутствует (свободный ход обгонной муфты), исследования процесса резания



1 – углецементный блок; 2 – исполнительный орган; 3 – упругий элемент;
4 – маятниковый возбудитель колебания

Рис. 1. Принципиальная схема стенда для исследования процесса резания угля исполнительным органом комбайна с рычажно-импульсным приводом

Fig. 1. Principal scheme of the stand for research of the process of coal cutting by the executive organ of the combine with lever-pulse drive

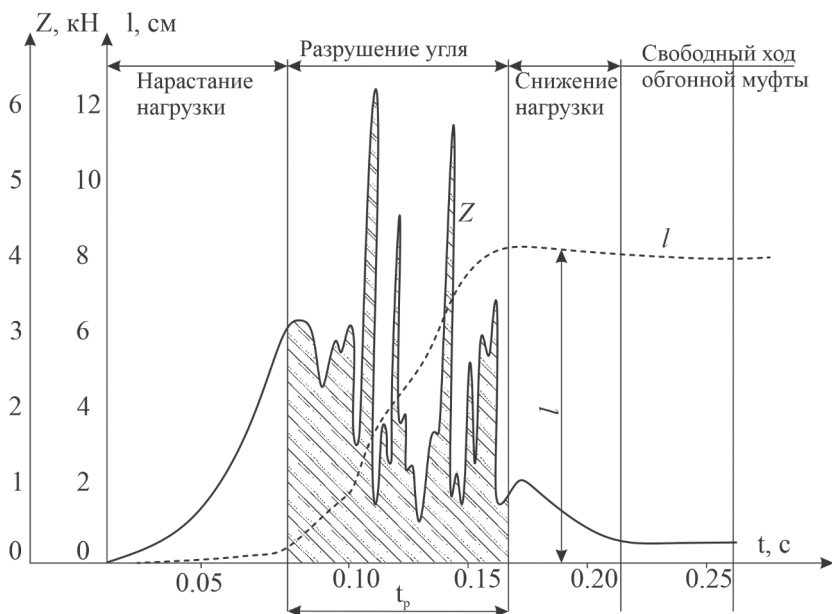


Рис. 2. График изменения сил резания Z и пути движения резца l во времени t при исследовании прерывистого процесса резания угля

Fig. 2. Graph of the change of cutting forces Z and cutting path l in time t in the study of intermittent coal cutting process

на стенде, согласно данным работы [14], проводились при нагружении исполнительного органа одиночными импульсами.

Полученные в результате стендовых исследований данные показали, что процесс нагружения резца при резании блока имеет характер, аналогичный работе рычажно-импульсного привода. Об этом свидетельствует и характер поведения кривой изменения сил резания Z (рис. 2), который показывает, что процесс нагружения исполнительного органа включает:

- нарастание нагрузки от нулевого значения до некоторой величины, при которой процесс разрушения углечемного блока отсутствует;
- действие в процессе резания угля нагрузки, равное усилию резанию;
- снижение нагрузки от величины, соответствующей усилию резания, до нуля при отсутствии процесса резания;

- отсутствие нагрузки на резце до следующего импульса нагружения.

В качестве параметров импульсов прерывистого процесса резания приняты длительность процесса резания за один импульс нагрузки t_p (с) и среднее значение скорости движения резца $V_{p,cp}$ за время t_p . Использование этих показателей в качестве параметров импульсов дает возможность связать их величину с одним из основных показателей режима работы комбайна с РИП — частотой вращения исполнительного органа n , а именно

$$n = \frac{t_p V_{p,cp} f}{\pi D} 60, \text{ об/мин}, \quad (1)$$

где f — частота возбудителя механических колебаний; D — диаметр исполнительного органа, м.

Величина $V_{p,cp}$ в опытах определялась как отношение пути, пройденного резцом за один импульс нагружения, к величине затраченного на это время t_p ,

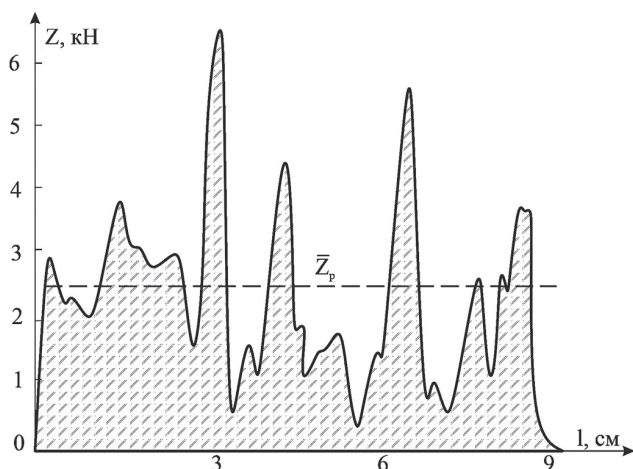


Рис. 3. График изменения усилий резания Z , преобразованный в функцию пути резания l по данным на рис. 2

Fig. 3. Graph of cutting forces Z transformed as a function of cutting path l using the data in Fig. 2

что свидетельствует о том, что параметр $V_{p,cp}$ по своему физическому смыслу аналогичен средней скорости резания при непрерывном процессе резания. Последнее дает возможность при сравнительном анализе использовать, кроме экспериментальных данных по непрерывному процессу резания, полученному на стенде (см. рис. 1), результаты других исследований [15–19].

В качестве параметров, характеризующих силовые и энергетические показатели, как при прерывистом, так и при непрерывном процессе резания, принято использовать [15, 20, 21] среднее по пути резания реза усилие резания \bar{Z}_p (кН) и энергоёмкость процесса резания H_w (кВт·ч/м³). Для оценки этих величин при прерывистом резании графики изменения нагрузки на резце (см. рис. 2) преобразовывались в графики по пути резания l (рис. 3), по которым находилось среднее значение усилия резания, а с учетом данных об объеме полученного продукта разрушения угольного блока определялась энергоёмкость процесса резания.

Предварительный (оценочный) анализ экспериментальных данных позво-

лил выдвинуть в качестве гипотезы предположение о том, что параметры импульсов нагружения значимо не влияют на силовые и энергетические параметры прерывистого процесса разрушения угля. Для проверки данного предположения имеющийся массив экспериментальных данных был разделен на группы по принадлежности к тому или иному участку исследованного диапазона параметров импульса t_p и $V_{p,cp}$.

Границами участков по диапазону изменения параметра t_p были приняты значения 0,04; 0,08; 0,12; 0,16 с и соответствующие им диапазоны изменения $V_{p,cp}$: 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 м/с. Проверка значимости отличия средних значений силовых и энергетических показателей, полученных в различных участках исследованного диапазона импульсов, от средних по всему диапазону значений осуществлялась статистическим методом с использованием дисперсионного анализа. Методика проведения такого анализа на примере соотношения усилий резания \bar{Z}_p и длительности процесса разрушения угля t_p при постоянной толщине стружки сводилась к последовательности проведения следующих операций.

С учетом числа параллельных опытов определялась дисперсия усилия резания \bar{Z}_p для i -го диапазона изменения.

Производилась проверка однородности дисперсий σ_{0i}^2 , полученных в различных участках исследованного диапазона t_p . Для этого из всех дисперсий выделялось наибольшее и наименьшее значение и по F -критерию Фишера — проводилась проверка значимости различия между дисперсиями. В случае однородности дисперсий наблюдаемое значение параметра $F_{\text{набл}} = \sigma_{0i(\max)}^2 / \sigma_{0i(\min)}^2$ всегда меньше табличного значения ($F_{\text{табл}}$).

Оценивалась дисперсия воспроизводимости по формуле

$$\sigma_{\text{воспр}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^p f_i \sigma_{0i}^2}{\sum_{i=1}^p f_i}, \quad (2)$$

где σ_{0i}^2 — дисперсия опытов в i -м участке последовательного диапазона; f_i — число степеней свободы, равное $f_i = n_i - 1$, где n_i — число параллельных опытов на i -м участке; p — число участков исследованного диапазона.

Определялась факторная дисперсия $\sigma_{\text{факт}}^2$ как дисперсия среднего значения усилий резания, характеризующая воздействие фактора изменяющегося параметра импульса на величину \bar{Z}_p :

$$\sigma_{\text{факт}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^p [(\bar{Z}_p)_{\text{средн}(i)} - (\bar{Z}_p)_{\text{средн}}]^2}{p - 1}, \quad (3)$$

где $(\bar{Z}_p)_{\text{средн}(i)}$ — среднее значение усилия резания в i -м интервале импульса;

$$(\bar{Z}_p)_{\text{средн}} = \sum_{i=1}^p (\bar{Z}_p)_{\text{средн}(i)} / p -$$

среднее значение усилия резания по всему диапазону изменения параметра импульса.

Проверялась гипотеза о равенстве средних значений $(\bar{Z}_p)_{\text{средн}}$ и $(\bar{Z}_p)_{\text{средн}(i)}$. Для этого по F -критерию Фишера про-

верялось значение дисперсии — факторной и воспроизводимости. Гипотеза принималась в том случае, если

$$F_{\text{набл}} = \sigma_{\text{факт}}^2 / \sigma_{\text{воспр}}^2 < F_{\text{табл}}.$$

В таблице приведены результаты дисперсионного анализа прерывистого процесса резания угля при различных значениях толщины стружки. Из приведенных данных следует, что при всех значениях параметров стружкообразования наблюдаемое значение критерия Фишера F меньше его табличного значения. Фактически это означает, что при постоянных значениях параметров стружкообразования средние значения усилий резания $(\bar{Z}_p)_{\text{средн}}$ по всему исследованному диапазону параметра импульсов t_p значимо не отличаются от текущих значений $(\bar{Z}_p)_{\text{средн}(i)}$ полученных по интервалам изменения параметра t_p в исследованном диапазоне.

Аналогичным образом был выполнен анализ влияния параметра импульса t_p на величину энергоемкости прерывистого процесса резания угля $H_{\text{вп}}$, а также параметра импульса $V_{\text{р.ср}}$ на $H_{\text{вп}}$ и \bar{Z}_p . Обработка экспериментальных данных показала, что во всех случаях наблюдаемое значение критерия Фишера $F_{\text{набл}}$ было меньше табличного значения.

Таким образом, гипотеза об инвариантности силовых и энергетических показателей прерывистого процесса разрушения к значениям параметров импульсов нагружения исполнительных органов комбайнов с рычажно-импульсным приводом в исследованном диапазоне параметров импульсов и параметров стружкообразования подтвердилась.

Исследование влияния режимных параметров стружкообразования на силовые и энергетические показатели процесса резания

Резание угля осуществлялось с выровненной поверхности, толщина струж-

Результаты дисперсионного анализа влияния параметра импульса t_p на усилие резания \bar{Z}_p
 Results of variance analysis of the effect of the pulse parameter t_p on the cutting force \bar{Z}_p

Толщина стружки h , см	Индекс интервала вала i	Интервал значений параметра t_p , с	Статистические показатели \bar{Z}_p		Проверка гипотезы об однородности дисперсий		Дисперсия воспроизводимости, $\sigma_{\text{воспр}}^2$	Среднее значения усилия резания в диапазоне $(\bar{Z}_p)_{\text{средн}}$	Факторная дисперсия	Проверка гипотезы	
			$(\bar{Z}_p)_{\text{средн}(i)}$, кН	$\sigma_{\text{от}}^2$	$F_{\text{набл}}/F_{\text{табл}}$	вывод, да/нет				$F_{\text{набл}}/F_{\text{табл}}$	вывод, да/нет
1,0	1	0,04 – 0,08	1,29	0,0135	1,61/6,1	да	0,0130	1,307	0,00083	0,064/6,7	да
	2	0,08 – 0,12	1,34	0,0167							
	3	0,12 – 0,16	1,29	0,0104							
2,0	1	0,04 – 0,08	2,43	0,0357	1,67/8,3	да	0,0408	2,420	0,00059	0,14/6,5	да
	2	0,08 – 0,12	2,38	0,0403							
	3	0,12 – 0,16	2,43	0,0561							
3,0	1	0,04 – 0,08	3,39	0,0500	3,48/15,5	да	0,107	3,497	0,00870	0,08/8,2	да
	2	0,08 – 0,12	3,56	0,112							
	3	0,12 – 0,16	3,54	0,174							

ки в опытах изменялась в диапазоне от 1 до 3 см, что соответствует рабочим режимам работы угледобывающих комбайнов.

Исследования влияния толщины стружки h на силу резания \bar{Z}_p показали, что характер зависимости $\bar{Z}_p = f(h)$ при непрерывном и прерывистых режимах резания одинаков, как по характеру изменения кривой (прямая линия), так и по величинам действующих усилий при равных значениях толщины стружки. Полученные результаты об отсутствии влияния режимов резания на характер зависимости $\bar{Z}_p = f(h)$ подтвердились и результатами проведенного дисперсионного анализа — во всем исследованном диапазоне изменения толщины стружки значимость отклонений математического ожидания средних значений усилий резания друг от друга, проверенного по критерию Фишера, была меньше табличных значений.

Известно [15, 22 — 25], что величина энергоёмкости процесса резания зависит не только от силовых показателей процесса резания, но и от объема продуктов разрушения угля в процессе резания, определяемого сечением стружки. В этой связи для оценки влияния режимных параметров стружкообразования на энергоёмкость резания в каждом опыте осуществлялся сбор продуктов разрушения.

В опытах по прерывистому процессу резания для сопоставимости с непрерывным резанием продукты разрушения угольного блока собирались на длине зачетного участка каждой борозды резания независимо от количества циклов резания. Для сравнения показателей гранулометрического состава разрушенного угля при непрерывном и прерывистом резании производилась расситовка продуктов разрушения по фракциям крупности. При этом энергоёмкость резания применительно к обо-

им режимам резания определялась по формуле

$$H_w = \frac{\bar{Z}_p l_p}{W_p \gamma_{об}^{-1}}, \text{ Н}, \quad (4)$$

где l_p — длина участка борозды резания, на котором производился сбор продуктов разрушения, м; W_p — масса продуктов разрушения на пути резания l_p , кг; $\gamma_{об}$ — плотность разрушаемого материала на пути резания l_p , т/м³.

Значения при прерывистом и непрерывном резании, полученные для разных толщин стружки, так же, как и в предыдущих случаях, анализировались с точки зрения значимости отличий средних по группам опытов величин H_w . Дисперсионный анализ показал, что, как и в анализе силовых показателей процессов резания, во всех рассмотренных опытах наблюдаемые значения критерия Фишера были меньше табличных значений. Ситовый анализ продуктов разрушения показал, что гранулометрический состав продуктов разрушения при прерывистом и непрерывном резании был практически одинаков.

*Исследование влияния
сопротивляемости угля
на силовые и энергетические
показатели непрерывного
и прерывистого
процессов резания*

Существующие в настоящее время методы инженерных расчетов непрерывного процесса резания угля режущими инструментами исполнительных органов угледобывающих комбайнов основаны на использовании показателя сопротивляемости угля резанию A [15]. Он характеризует способность углей и угольных пластов в целом противостоять механическому воздействию на них эталонного резца ДКС при резании с выровненной поверхности толщиной стружки, равной 1 см.

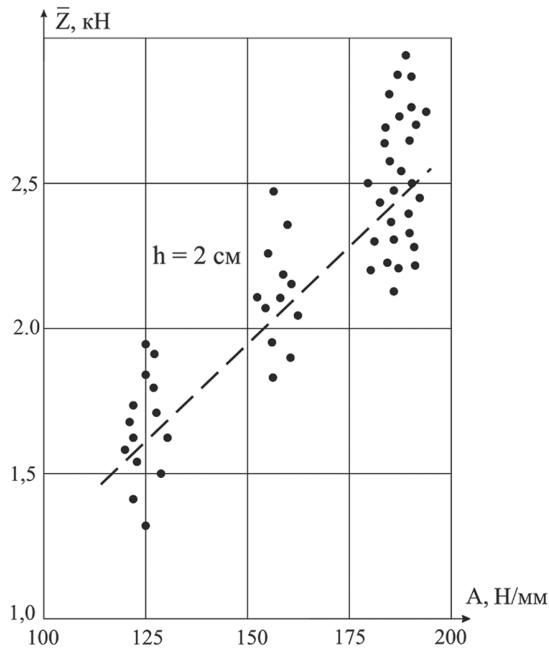


Рис. 4. Влияние сопротивляемости резания A на силы резания \bar{Z}_p при прерывистом (точки на графике) и непрерывном (прямая линия) резании

Fig. 4. Effect of cutting resistance A on cutting forces \bar{Z}_p for intermittent (dots on the graph) and continuous cutting (straight line)

Для проверки возможности использования сопротивляемости угля резанию при определении силовых и энергетических показателей прерывистого процесса резания, реализуемого в машинах с рычажно-импульсным приводом, была выполнена серия экспериментов по разрушению углечементных блоков, имеющих различные прочностные свойства. Их сопротивляемость резанию определялась по стандартной методике [26, 27].

Точки, выложенные на график зависимости $\bar{Z}_p = f(A)$, полученные при прерывистом резании, и прямая линия, построенная на основании выполненных по отраслевому стандарту [28] расчетов, показали, что характер поведения прямой хорошо описывает массивы точек, полученных при прерывистом резании углечементных блоков, имеющих различную сопротивляемость реза-

нию (рис. 4).

Отсутствие влияния характера резания (прерывистого и непрерывного) на характер поведения кривой зависимости $\bar{Z}_p = f(A)$ и ее численные значения подтвердились и результатами статистической проверки методом дисперсионного анализа с использованием критерия Фишера — во всех случаях наблюдаемое значение F -критерия было меньше табличного значения.

Выводы

Таким образом, на основании полученных результатов по оценке влияния прерывистого и непрерывного процессов резания на силовые и энергетические показатели процесса можно сделать следующие выводы.

Процесс нагружения режущего инструмента в каждом цикле работы рычаж-

но-импульсного привода включает интервалы времени, когда процесс резания угля отсутствует.

Установлено, что в исследованном диапазоне параметров импульсов, которые соответствуют рабочим режимам комбайнов с РИП, силовые и энергетические показатели прерывистого процесса резания угля от параметров импульсов не зависят. Не обнаружено значимых отличий между силовыми и энер-

гетическими показателями прерывистого и непрерывного процессов резания угля в исследованном диапазоне изменения параметров стружкообразования. Влияние прочностных свойств разрушаемого угольного массива на силовые показатели прерывистого процесса резания комбайном с РИП может быть оценено с использованием известных методик расчета для непрерывного процесса резания.

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. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.

14. Устюжанин С. В. Исследование силовых и энергетических параметров процесса резания угля применительно к комбайнам с рычажно-импульсным приводом / Научные сообщения Института горного дела им. А.А. Скочинского. Механизация и автоматизация подземной добычи угля: Сборник научных статей. Вып. 218. — М., 1983. — С. 81 — 88.
15. Позин Е. З., Меламед В. З., Тон В. В. Разрушение углей выемочными машинами / Под общей ред. Е. З. Позина. — М.: Недра, 1984. — 288 с.
16. Линник Ю. Н., Линник В. Ю. Разрушение угольных пластов при добыче выемочными машинами. — М.: ИНФРА-М, 2022. — 356 с.
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. 2018. DOI: 10.1155/2018/7975141.
18. Li Xueyi, Huang Binbing, Ma Guoying, Zeng Qingliang Study on road header cutting load at different properties of coal and rock // Hindawi Publishing Corporation the Scientificworld 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, 012022. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012022.
20. Шабаетов 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. Нечепавев В. Г., Шабаетов О. Е., Степаненко Е. Ю., Зинченко П. П. Имитационная модель функционирования шнековых очистных комбайнов, предназначенных для выемки тонких пологонаклонных пластов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. — 2019. — № 2. — С. 26 — 34.
22. Жабин А. Б., Поляков А. В., Аверин Е. А., Линник Ю. Н. Основы проектирования исполнительных органов тоннелепроходческих машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 6. — С. 156 — 164. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-156-164.
23. Позин Е. З., Меламед В. З., Азовцева С. М. Измельчение углей при резании. — М.: Наука, 1977. — 138 с.
24. Хорешок А. С. Разработка и создание рабочих органов выемочных машин для улучшения сортового состава добываемого угля: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. — Кемерово: КузГТУ, 1997. — 36 с.
25. 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.ijrmmms.2017.11.004.
26. Позин Е. З. Инструкция по определению показателей сопротивляемости углей разрушению при помощи динамометрического сверла СДМ-1. 1964. — 35 с.
27. Методика оценки и классификация угольных пластов основных бассейнов СССР. — М.: Ин-т горн. дела им. А.А. Скочинского, 1978. — Ч. I. — 47 с.; ч. II. — 113 с.
28. ОСТ 12.44.258-84. Комбайны очистные. Выбор параметров и расчет сил резания и подачи на исполнительных органах. Методика. — М.: Изд-во Министерства угольной промышленности СССР, 1985. — 108 с. **ПТАБ**

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. *Copyright certificate USSR No. 599122.* 1978. [In Russ].
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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 uglja: Sbornik nauchnykh statey, vyp. 218* [Scientific reports of the A.A. Skochinsky Institute of Mining. Mechanization and automation of underground coal mining: Collection of scientific articles, issue 218], Moscow, 1983, pp. 81 – 88.
15. Pozin E. Z., Melamed V. Z., Ton V. V. *Razrushenie uglj vyemochnymi mashinami* [Coal cutting by winning machines], Moscow, Nedra, 1984, 288 p.
16. Linnik Yu. N., Linnik V. Yu. *Razrushenie ugot'nykh plastov pri dobyche vyemochnymi mashinami* [Destruction of coal seams by mining machines], Moscow, INFRA-M, 2022, 356 p.
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. 2018. DOI: 10.1155/2018/7975141.
18. Li Xuanyi, Huang Binbing, Ma Guoying, Zeng Qingliang Study on road header cutting load at different properties of coal and rock. *Hindawi Publishing Corporation the Scientificworld 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, 012022. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012022.
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. Nechepaev V. G., Shabaev O. E., Stepanenko E. Yu. P. Simulation model of the functioning of auger shearers designed for excavation of thin declivities. *Progressivnye tehnologii i sistemy mashinostroeniya.* 2019, no. 2, pp. 26 – 34. [In Russ].

22. Zhabin A. B., Polyakov A. V., Averin E. A., Linnik Yu. N. Design basis for tunnel boring machine cutter heads. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 6, pp. 156–164. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-156-164.

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

24. Khoreshok A. S. *Razrabotka i sozdanie rabochikh organov vyemochnykh mashin dlya uluchsheniya sortovogo sostava dobyvaemogo uglya* [Development and creation of working bodies of mining machines for improving the grade composition of the extracted coal], Doctor's thesis, Kemerovo, KuzGTU, 1997, 36 p.

25. 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.

26. Pozin E. Z. *Instruktsiya po opredeleniyu pokazateley soprotivlyaemosti ugley razrusheniyu pri pomoshchi dinamometricheskogo sverla SDM-1* [Instruction on determination of indices of coal resistance to fracture by means of dynamometric drill SDM-1], 1964, 35 p.

27. *Metodika otsenki i klassifikatsiya ugol'nykh plastov osnovnykh basseynov SSSR* [Methodology of evaluation and classification of coal seams of the main basins of the USSR], Moscow, 1978. part I, 47 p.; part II, 113 p. [In Russ].

28. *OST 12.44.258-84. Kombayny ochistnye. Vybor parametrov i raschet sil rezaniya i podachi na ispolnitel'nykh organakh. Metodika* [Industry standards OST 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 10.10.2024.

Received by the editors 28.11.2023; received after the review 30.01.2024; accepted for printing 10.10.2024.

