

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОВЛИЯНИЯ НАГРУЗОК НА РЕЗЦАХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРАХ РАЗРУШЕНИЯ УГЛЯ

Ю.Н. Линник¹, В.Ю. Линник¹

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

Аннотация: Выполнены исследования взаимодействия силовой нагруженности рядом расположенных резцов, направленные на совершенствование определения спектров действующих нагрузок на исполнительных органах комбайнов. Исследования проводились при резании углещементных блоков на продольно-строгательном станке и на полноразмерном стенде при работе комбайна. В качестве параметров резания были приняты шаг резания, расстояние между резцами в направлении скорости резания и толщина стружки. Было установлено, что мгновенные значения усилий резания на соседних резцах при их взаимном расположении, как при постоянной, так и при переменной толщине стружки, линейно не коррелируют друг с другом, что объясняется наличием расстояния между резцами в направлении скорости резания, в результате чего фронт деформаций от последующего резца достигает зоны действия опережающего резца с определенным запаздыванием. Установлено наличие взаимовлияния усилий резания во времени, проявляющегося в том, что изменение нагрузки на одном резце в результате реализации крупного скола с образованием передового выкола способствует сколообразованию на другом резце по истечении времени запаздывания. Взаимовлияние во времени усилий резания на соседних резцах носит периодический характер и наиболее полно проявляется при отношениях параметров схемы резания, близких к оптимальному.

Ключевые слова: резание, угольный блок, сила резания, сколообразование, опережающий выкол, взаимовлияние при резании парными резцами, шаг резания, толщина стружки, коэффициент корреляции, доверительный интервал.

Для цитирования: Линник Ю. Н., Линник В. Ю. Исследование взаимовлияния нагрузок на резцах при различных параметрах разрушения угля // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 5. – С. 133–143. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_5_0_133.

Mutual influence of loads on cutting picks at different coal cutting parameters

Yu.N. Linnik¹, V.Yu. Linnik¹

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

Abstract: The analysis of mutual influence between loads applied to neighbor cutting picks aims to improve identification of the actual load spectrum on the attachments of cutter-loaders. The studies included cutting of coal-and-cement blocks on a surface planing machine and on a test bench representing a full-scale model of a cutter-loader. The adopted cutting parameters were the pitch of cutting, the spacing of cutting picks in the direction of cutting velocity and the

chip thickness. It is found that instantaneous cutter loads on neighbor cutting picks in their mutual alignment show no linear correlation neither at constant nor at varied chip thickness. This is explained by the spacing between the cutting picks in the direction of the cutting velocity: the front of deformations generated by the rearward pick reaches the zone of action of the forward pick at a certain delay. The mutual influence of the cutter loads in time lies in the discovered fact that the change in the load on one cutting pick as a result of a large-size shear with a front indent facilitates shearing by the other pick at the end of the time lag. The mutual influence of the loads on neighbor picks in time has a periodic nature, and shows itself to the fullest extent when the cutting diagram parameters approach an optimal relationship.

Key words: cutting, coal block, cutting force, shearing, front indent, mutual influence in cutting by paired picks, cutting pitch, chip thickness, correlation coefficient, coincidence interval.

For citation: Linnik Yu. N., Linnik V. Yu. Mutual influence of loads on cutting picks at different coal cutting parameters. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(5):133-143. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_5_0_133.

Введение

Одним из важных аспектов обеспечения требуемой надежности угледобывающих комбайнов является расчет элементов трансмиссий на усталостную прочность, достоверность которого существенным образом зависит от определения величины действующих нагрузок и характеристик их неравномерности. Результаты выполненных ранее исследований [1–3] позволили получить расчетные зависимости, которые легли в основу отраслевого стандарта ОСТ 12.44.109-79 [20], позволившего существенно повысить точность определения спектров действующих нагрузок при выборе параметров угледобывающих комбайнов на стадии их проектирования. Однако практика использования расчетных методов при разработке высоконагруженных трансмиссий современных комбайнов выявила ряд неучтенных факторов, к которым относятся применение бесцепных систем подачи (БСП) различной жесткости, сочетание высоких скоростей подачи с большими нагрузками, нарушение схем расстановки режущего инструмента на исполнительных органах из-за частых поломок резцов [4–6] при выемке пластов сложного строения.

В этой связи был выполнен цикл исследований, направленных на совершенствование определения спектров действующих нагрузок на исполнительных органах комбайнов. В рамках настоящей статьи описаны результаты исследований взаимовлияния нагрузок на резцах при различных параметрах разрушения.

Методика проведения исследований

Экспериментальные исследования проводились на продольно-строгательном станке при резании углещементных блоков и на полноразмерном стенде, оборудованном комбайном 2K52M. Возникающие при резании углещементных блоков усилия в обоих случаях регистрировались тензодинамометрами, сигналы с которых поступали на тензометрический усилитель, после чего выводились на осциллограф. Для определения диапазона параметров резания были проанализированы параметры взаимного расположения соседних резцов на шнековых исполнительных органах серийно выпускаемых и вновь создаваемых угледобывающих комбайнов. Было установлено, что расстояние между резцами в направлении скорости резания

для всех комбайнов изменяется в пределах $l = 70 \div 440$ мм, причем для большинства комбайнов оно находится в пределах $l = 120 \div 200$ мм. Расстояние между линиями резания $t_{\text{ш}}$ (шаг резания) в зависимости от схемы расстановки резцов на шнеках изменяется в пределах $t_{\text{ш}} = 50 \div 100$ мм. При проведении экспериментов учитывались наиболее характерные для угледобывающих комбайнов параметры схем расстановки резцов: шаг резания $t_{\text{ш}}$ принимался равным 15 (характерный для кутковых линий резания), 25, 30 и 45 мм при расстоянии между резцами l в направлении скорости резания 120, 160 и 270 мм. Толщина стружки при этом составляла $h = 20$ мм, что соответствовало ее средней величине при серповидном срезе шнековым исполнительным органом комбайна, работающего со средними скоростями подачи и частотами вращения шнека. Резание осуществлялось парными резцами, которые устанавливались относительно друг друга с параметрами, указанными выше.

Как известно, формирование усилий резания на резцах при разрушении угля носит случайный характер [7 – 10]. Поэтому методика статистического анализа реализаций усилий резания предусматривала следующую последовательность. Сначала осуществлялась проверка гипотезы о независимости усилий резания, возникающих на опережающем Z_1 и последующем (отстающем) Z_2 резцах с помощью критерия независимости [11]. Для этого рассчитывалась таблица размерности $J_1 \times J_2$ распределения случайных величин Z_1 и Z_2 . Делением частоты каждой клетки таблицы на сумму всех частот получали соответствующие вероятности. При независимости случайных величин усилий резания частота некоторой внутренней клетки таблицы распределения равна произведению итоговых частот J_1 -й строки и J_2 -го столб-

ца, деленному на сумму всех частот n . Сумма квадратов разностей между наблюдаемыми и выравшиваемыми частотами таблицы распределений, деленных на соответствующую выравшиваемую частоту, представляет в рассматриваемом случае статистику χ^2 , значение которой рассчитывалось по известной формуле [11]. Если оказывалось, что рассчитанное значение χ^2 превышало его табличное значение при данном числе степеней свободы v на общепринятом значении уровня значимости $\alpha = 0,05$, то предположение о независимости усилий резания Z_1 и Z_2 не подтверждается и, следовательно, можно считать установленным наличие статистической связи между ними. Число степеней свободы определяется из соотношения $v = n - 2$.

В случае установления факта статистической зависимости между возникающими на резцах усилиями резания проводилась оценка характера этой зависимости, позволяющая определить, является ли установленная зависимость линейной или нелинейной. В случае установления линейности зависимости она оценивалась коэффициентом корреляции r . Факт же наличия нелинейности зависимости проверялся расчетом корреляционного отношения. На заключительном этапе анализа оценивались доверительные интервалы для коэффициента корреляции, если предпочтение отдавалось гипотезе о линейности зависимости, а в случае нелинейности зависимости осуществлялся подбор аппроксимирующего выражения.

Результаты исследований

1. Оценка взаимовлияния усилий резания на соседних резцах

Согласно вышеизложенной методике, на первом этапе обработки экспериментальных данных, полученных при резании углещементных блоков парными резцами, была осуществлена проверка

гипотезы об отсутствии статистической зависимости между усилиями резания. Проверка полученного массива данных по критерию независимости подтвердила гипотезу об отсутствии статистической связи для всех реализаций с установкой пары резцов с шагом резания $t_{\text{ш}} = 15$ мм. Во всех случаях рассчитанные значения статистики χ^2 при уровне значимости $\alpha = 0,05$ были меньше табличных значений $\chi^2 = 9,488$ и $\chi^2 = 10,919$ для чисел степеней свободы $\nu = 4$ и 9 соответственно. Как показал анализ, причина отсутствия статистической зависимости в рассмотренном случае связана с тем, что малая величина шага резания, характерная для кутковых линий резания, значительно меньше оптимума для линейных резцов практически для всех условий эксплуатации угледобывающих комбайнов, обусловила работу отстающего резца в зоне работы опережающего. Это приводило к значительному (на 30÷40%) снижению усилий резания Z_2 на отстающем резце по сравнению с Z_1 на опережающем. Кроме этого, процесс резания отстающим резцом был нестационарным, поскольку периодически во время резания в зонах передовых выколов опережающим резцом нагрузка на первом снижалась до нулевых значений. На основании результатов такой проверки пары реализаций с шагом установки резцов $t_{\text{ш}} = 15$ мм из дальнейшего анализа были исключены.

Наиболее близким к оптимальному при формировании усилий резания в экспериментах, проводимых на продольно-строгательном станке, было значение шага резания $t_{\text{ш}} = 45$ мм. При резании с шагом $t_{\text{ш}} = 60$ мм между бороздами развала опережающего и отстающего резцов оставался неразрушенный целик угля, что явным образом свидетельствует об отсутствии их силового взаимодействия. Данное обстоятельство по-

служило основанием также исключить из дальнейшего корреляционного анализа пару реализаций с шагом резания $t_{\text{ш}} = 60$ мм.

Прежде чем приступить к анализу масштаба и характера корреляции усилий резания на соседних резцах, предварительно оценим доверительные границы коэффициента корреляции для условий проведения экспериментов. При решении вопроса, будет ли наблюдаемое значение коэффициента корреляции ρ указывать на какую-либо корреляцию в общей совокупности, как известно, применяется статистика t , значение которой рассчитывается по формуле [11]

$$t = \frac{\rho}{\sqrt{n-2}} \cdot \sqrt{n-2}, \quad (1)$$

где n — число суммируемых пар значений случайных величин Z_1 и Z_2 (при проведении экспериментов $n = 1024$).

При общепринятом для инженерных расчетов значении $\alpha = 0,05$ в случае $n > 120$ граничное значение статистики $t = 1,96$, а значение доверительных интервалов $\rho_{\text{д}}$ равно

$$\rho_{\text{д}} = \pm \sqrt{\frac{t^2}{t^2 + n - 1}} = \pm 0,061 \cdot \quad (2)$$

Следуя рекомендациям [11], были рассчитаны двумерные плотности распределения совокупности пар усилий резания Z_1 и Z_2 . Полученные результаты показали, что в рассматриваемых условиях процесса резания угля двумерная плотность распределения существенно отличается от нормальной. Таким образом, значения доверительных пределов, рассчитанные по выражению (2), следует признать заниженными, так как асимметричная форма двумерного распределения будет причиной завышенной оценки коэффициента корреляции.

Для проверки корреляции мгновенных значений усилий резания соседних резцов был выполнен статистический

Таблица 1

Характеристики усилий резания и их взаимовлияния при резании углицементного блока на продольно-строгательном станке
Characteristics of cutting forces and their mutual influence when cutting a carbon block on a slitting and planing machine

Шаг установки резцов t_w , мм	Расстояние между резами в направлении скорости резания l , мм	Пределы изменения в опытах усилий резания на отстающем Z_2 и опережающем Z_1 резах (Z_2/Z_1), Н	Пределы изменения в опытах коэффициента вариации усилий резания на отстающем v_{z_2} и опережающем v_{z_1} резах (v_{z_2}/v_{z_1})	Коэффициенты корреляции усилий резания ρ
25	120	930–1017/873–1031	0,61–0,7/0,63–0,69	(–0,035)–(+0,079)
25	160	869–941/909–1007	0,63–0,70/0,63–0,70	(–0,050)–(+0,031)
25	270	934–993/874–1030	0,62–0,71/0,67–0,77	(–0,042)–(+0,037)
30	120	751–1024/902–1146	0,62–0,92/0,63–0,77	(–0,043)–(+0,173)
30	160	937–1102/933–1069	0,59–0,64/0,60–0,65	(–0,031)–(+0,057)
30	200	935–1123/984–1207	0,53–0,78/0,71–0,76	(–0,045)–(+0,040)
30	270	1371–1485/1146–1281	0,53–0,59/0,54–0,68	(–0,020)–(+0,031)
45	120	1147–1749/1531–1783	0,64–0,86/0,62–0,79	(–0,049)–(+0,063)
45	160	1284–1567/1217–1752	0,49–0,63/0,51–0,67	(–0,031)–(+0,090)
45	200	1312–1522/1353–1605	0,60–0,67/0,68–0,81	(–0,033)–(+0,034)
45	270	1491–1969/1374–1728	0,66–0,79/0,55–0,82	(–0,010)–(+0,038)

анализ на наличие линейной и нелинейной корреляции их значений. Проверка на линейность зависимости производилась по коэффициенту корреляции сил резания, значения которого при разрушении углицементного блока на продольно-строгательном станке приведены в табл. 1.

Из данных, приведенных в таблице, следует, что, за редким исключением проявления весьма слабой корреляции, в подавляющем большинстве опытов отсутствует корреляция усилий резания Z_1 и Z_2 , поскольку значения их коэффициентов корреляции накрываются доверительным интервалом $\rho_d = \pm 0,061$.

Аналогично выполненный анализ на наличие нелинейной связи усилий Z_1 и Z_2 по величине корреляционного отношения также указал на отсутствие закономерной связи усилий резания соседними отстающим и опережающим резами.

Результаты оценки корреляции средних значений усилий Z_1 и Z_2 при разрушении углицементного блока на полноразмерном стенде, оборудованном комбайном 2K52M, приведены в табл. 2.

Сравнение значений коэффициентов корреляции усилий, полученных при резании на продольно-строгательном станке с неизменяемой за один проход толщиной стружки (табл. 1), а также полученных при резании комбайном на полноразмерном стенде с серповидной (переменной) толщиной стружки (см. табл. 2), показывает, что абсолютные значения коэффициента корреляции во второй серии экспериментов несколько выше, чем в первой, но с учетом выявленного характера плотности распределения нагрузки на резце, существенно отличающегося от нормального, полученные данные на полноразмерном стенде также дают основание оценить корреляцию значений усилий резания Z_1 и Z_2 как весьма слабую.

Таблица 2

Характеристики усилий резания и их взаимовлияния при разрушении углицементного блока на полноразмерном стенде
Characteristics of cutting forces and their mutual influence during fracture of a carbon-cement block on a full-size bench

Средняя скорость подачи комбайна V_n , м/мин	Пределы изменения средней силы резания на отстающем резце Z_2 , Н	Пределы изменения средней силы резания на опережающем резце Z_1 , Н	Пределы изменения среднего значения коэффициента корреляции усилий резания ρ
0,55	796÷898	831÷915	(-0,041)÷(+0,196)
0,98	1062÷1190	1003÷1184	(-0,038)÷(+0,059)
1,50	1280÷1367	1204÷1397	(-0,093)÷(+0,132)

2. Оценка взаимовлияния усилий резания на соседних резцах во времени при неизменных параметрах резания.

Для оценки взаимовлияния соседних резцов на процесс разрушения угольного массива использовался математический аппарат взаимокорреляционных функций. С этой целью для совокупности пар реализаций усилий резания $Z_1(\tau)$ и $Z_2(\tau)$, полученных в эксперименте, рассчитывались нормированные взаимокорреляционные функции влияния опережающего (первого) резца на отстающий (второй) $\rho_{z_1z_2}(\tau)$, и наоборот, $\rho_{z_2z_1}(\tau)$.

На рисунке приведены взаимокорреляционные функции усилий резания для различных значений параметров резания l и t опережающим и отстающим резцами. Из приведенных на рисунке графиков видно, что функции $\rho_{z_2z_1}$ существенно отличаются от функции $\rho_{z_1z_2}(\tau)$ как по характеру поведения, так и по величине значений. Прежде всего обращает на себя внимание характерная форма функции $\rho_{z_2z_1}$ при малых значениях временного сдвига τ (участок $A-M-E$ на кривых), где эта функция положительна и имеет выраженный максимум в точке M , в которой коэффициент корреляции ρ достигает значений от 0,22 (см. рисунок, а) до 0,29 (см. рисунок, в). На функции $\rho_{z_1z_2}(\tau)$ в данном интервале вре-

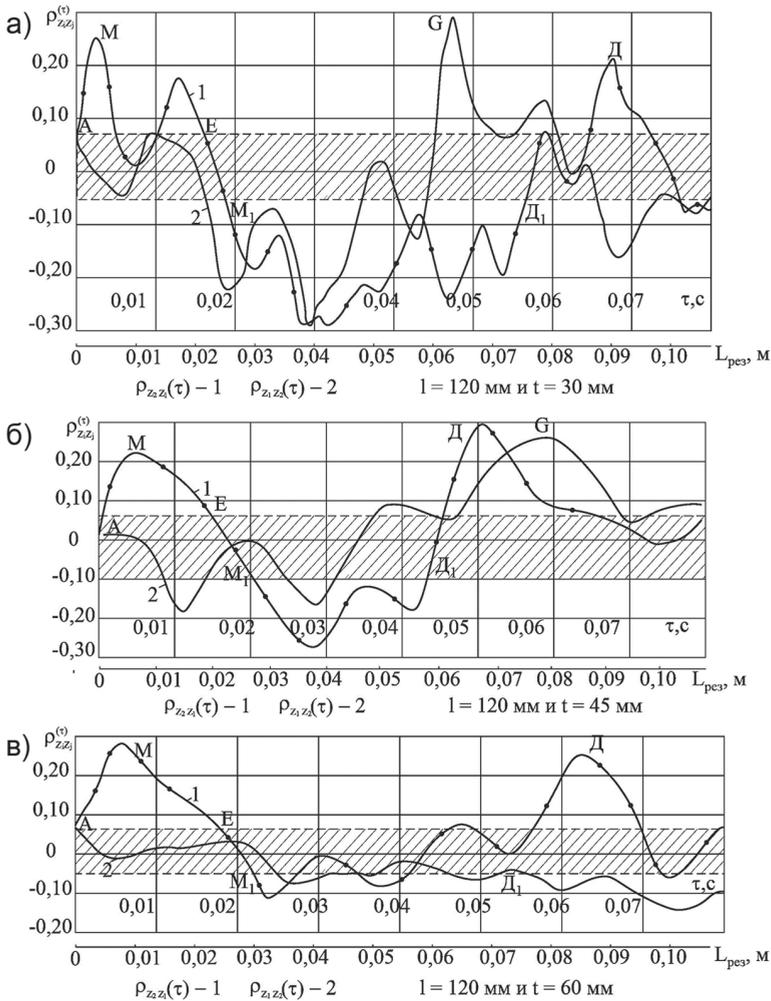
менного сдвига подобный максимум отсутствует. Величина сдвига по времени в окрестностях точки M находится в диапазоне $\tau_M = 0,0016 \div 0,0044$ с. Учитывая то обстоятельство, что, исходя из соотношения $L_1 = \sqrt{t^2 + l^2}$, расстояние в плоскости между режущими кромками соседних резцов находилось в рассмотренных случаях соотношения параметров t и l в пределах $L_1 = 130 \div 170$ мм, такое время запаздывания τ_M соизмеримо со временем перемещения фронта деформаций разрушаемого массива от отстающего резца к опережающему [12].

Таким образом, статистически значимая величина коэффициента корреляции в области, прилегающей к точке M , свидетельствует о наличии силового взаимодействия между резцами, запаздывание в реализации которого определяется величиной расстояния между резцами в направлении скорости резания.

Вслед за областью положительной корреляцией усилий резания Z_1 и Z_2 (интервал от точки A до точки E) с максимумом в точке M для функции $\rho_{z_2z_1}(\tau)$ при резании с шагом $t = 30$ мм (см. рисунок, а), являющимся неоптимальным для данных условий резания, характерна область отрицательной корреляции (интервал $M_1 - D_1$). Аналогичным образом выглядит и поведение функции $\rho_{z_1z_2}(\tau)$ при ($t < t_{\text{онт}}$) в интервале $M_1 - D_1$ (см. рисунок, а, б). При резании с шагом

$t = 60$ мм ($t > t_{\text{опт}}$) вслед за максимумом в точке M для функций $\rho_{z_2z_1}(\tau)$ и $\rho_{z_1z_2}(\tau)$ характерна область отсутствия корреляционной связи усилий резания, так как в интервале резания от точки M_1 до D_1 ординаты этих функций практически не выходят за границы доверительного интервала (заштрихованная область на рисунке, θ). Вне зависимости от величины шага резания для функций $\rho_{z_2z_1}(\tau)$ характерно наличие второй области поло-

жительной корреляции с максимумом в точке D . При трактовке физической сущности взаимодействия усилий резания Z_1 и Z_2 во времени τ следует учитывать, что расстояние от точки M до точки D между положительными максимумами функции $\rho_{z_2z_1}(\tau)$ соответствует по времени периоду низкочастотной составляющей усилия резания [12, 13], частота которой и, соответственно, сдвиг по времени в этих точках τ_{M-D} зависят от



Взаимнокорреляционные функции $\rho_{z_2z_1}(\tau)$ — кривая 1 и $\rho_{z_1z_2}(\tau)$ — кривая 2 на пути резания $L_{\text{рез}}$ с параметрами резания: $l = 120$ мм, $t = 30$ мм (а); $l = 120$ мм, $t = 45$ мм (б); $l = 120$ мм, $t = 60$ мм (в)

Mutually correlated functions $\rho_{z_2z_1}(\tau)$ — curve 1 and $\rho_{z_1z_2}(\tau)$ — curve 2 on the cutting path L_{cut} with cutting parameters: $l = 120$ мм, $t = 30$ мм (а); $l = 120$ мм, $t = 45$ мм (б); $l = 120$ мм, $t = 60$ мм (в)

параметров разрушения угля. Так, для условий разрушения с шагом резания $t = 30$ мм сдвиг по времени $\tau_{M-д}$ соответствовал частоте $f \approx 22$ Гц, а для $t = 45$ мм и $t = 60$ мм частоте примерно 16 Гц и 18 Гц соответственно.

Таким образом, на основании вышеизложенного следует вывод о том, что силовое взаимодействие во времени совместно работающих резцов при постоянных параметрах резания носит периодический характер и его частота зависит от шага резания и определяется параметрами отделяемых от массива крупных кусков разрушаемого материала. Наличие при резании с шагом $t \leq t_{\text{опт}}$ области отрицательных значений функций $\rho_{z_2z_1}(\tau)$ и $\rho_{z_1z_2}(\tau)$ можно дать следующее объяснение. Вслед за достижением резцом 2 зоны деформации, инициированной резцом 1, и установлением силового взаимодействия между ними, на одном из резцов реализуется отделение от массива крупного элемента стружки с образованием значительной зоны передового выкола. Поскольку при работе резца в зоне собственного передового выкола центрированное математическим ожиданием усилие резания (центрирование обусловлено алгоритмом расчета взаимнокорреляционных функций) становится преимущественно отрицательным, а на другом резце знак центрированного усилия остается случайным, рассматриваемые взаимнокорреляционные функции имеют отрицательное значение.

При резании с шагом, большим оптимального (см. рисунок, в), условия разрушения угля становятся неблагоприятными для возникновения крупных сколов [14–16], сопровождающихся значительными по размерам передовыми выколами. Это подтверждается и наличием неразрушенных целиков угля между бороздами резания. В таких условиях резания на резцах реализуются сколы относительно малых размеров, что при-

водит к менее значительному и более стохастическому изменению (уменьшению) усилий резания. Именно это и является причиной того, что при резании с большим шагом (см. рисунок, в) в функциях $\rho_{z_2z_1}(\tau)$ и $\rho_{z_1z_2}(\tau)$ практически отсутствуют характерные зоны отрицательных значений.

Наличие характерного максимума G положительной корреляции на функции $\rho_{z_1z_2}(\tau)$ в случае резания с шагом $t < t_{\text{опт}}$ (см. рисунок, а) объясняется следующим. После реализации крупного скола на опережающем резце 1 и соответствующего этому относительного снижения усилия $Z_1(\tau)$ по сравнению с математическим ожиданием на отстающем резце 2 также возникает с запаздыванием крупный скол, осуществлению которого способствует дополнительная свободная поверхность, которая образовывается в массиве сколом на опережающем резце 1. Вслед за этим центрированное усилие $Z_2(\tau)$ становится отрицательным и коррелирует с усилием $Z_1(\tau)$ со сдвигом τ_G .

Ввиду того, что при шаге резания $t = 45$ мм соблюдаются оптимальные условия резания, скол на отстающем резце 2 происходит раньше. Что подтверждается меньшим запаздыванием τ_G по сравнению с реализацией для $t = 30$ мм [17–19].

При резании с шагом $t > t_{\text{опт}}$ (см. рисунок, в) характерный положительный максимум на функции $\rho_{z_1z_2}(\tau)$ отсутствует, что свидетельствует об отсутствии вышеописанного механизма влияния опережающего резца 1 на отстающий 2.

Характеризуя в целом механизм силового взаимодействия опережающего и отстающего резцов во времени, заметим, что при рассматриваемых параметрах резания с шагом $t < t_{\text{опт}}$ изменение нагрузки на одном из резцов в результате реализации крупного скола с образованием передового выкола приводит

к сколообразованию на другом резце по истечении определенного времени (времени запаздывания). То есть резцы работают как бы в противофазе, когда скол на одном из них создает более благоприятное условие для сколообразования на другом. Причем в несколько более предпочтительных условиях работает отстающий резец 2, реализации процесса сколообразования на котором способствует разупрочняющее воздействие на массив опережающего резца 1.

Выводы

1. Мгновенные значения усилий резания на соседних резцах при их взаимном расположении, характерном для современных шнековых исполнительных органов угледобывающих комбайнов, как при постоянной, так и при переменной толщине стружки, линейно не коррелируют между собой.

2. Отсутствие корреляции мгновенных значений усилий резания объясняется наличием расстояния между резцами в направлении скорости резания, в результате чего фронт деформаций от последующего резца достигает зоны действия опережающего резца с определенным запаздыванием.

3. Установлено наличие взаимовлияния усилий резания во времени, проявляющегося в том, что изменение нагрузки на одном из резцов в результате реализации крупного скола с образованием передового выкола способствует сколообразованию на другом резце по истечении времени запаздывания.

4. Взаимовлияние во времени усилий резания на соседних резцах носит периодический характер и наиболее полно проявляется при отношениях параметров схемы резания, близких к оптимальному.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Позин Е. З., Меламед В. З., Тон В. В. Разрушение углей выемочными машинами. — М.: Недра, 1984. — 288 с.
2. Позин Е. З., Головашкин Ю. В. Выбор эффективных схем расстановки резцов для шнековых исполнительных органов комбайнов // Уголь. — 1978. — № 2. — С. 46—51.
3. Моделирование разрушения углей режущими инструментами / Под ред. Ю. Д. Красникова. — М.: Наука, 1981. — 181 с.
4. Линник Ю. Н., Жабин А. Б., Линник В. Ю., Поляков А. В. Оценка влияния отказов резцов и резцедержателей на показатели эффективности работы угледобывающих комбайнов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2018. — № 2. — С. 247—263.
5. Шабаетов О. Е., Бредун И. И. Техническая диагностика резцового исполнительного органа проходческого комбайна // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 9. — С. 94—101. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-9-0-94-101.
6. Захаров В. Н., Линник Ю. Н., Линник В. Ю., Жабин А. Б. Оптимизация параметров исполнительных органов угледобывающих машин // Горный журнал. — 2020. — № 4. — С. 44—47. DOI: 10.17580/gzh.2020.04.11.
7. Габов В. В., Задков Д. А., Нгуен Кхак Линь Особенности формирования элементарных сколов в процессе резания углей и изотропных материалов эталонным резцом горных машин // Записки Горного института. — 2019. — Т. 236. — С. 153—161. DOI: 10.31897.2019.2.153.
8. Жабин А. Б., Поляков А. В., Аверин Е. А. Сопоставление отечественных и зарубежных методов расчета усилий на лобовых дисковых шарошках при разрушении горных пород // Горный журнал. — 2018. — № 12. — С. 65—68. DOI: 10.17580/gzh.2018.12.13.
9. Zakharov V. N., Linnik V. Y., Linnik Y. N., Averin E. A. Loading of coal mining machine tools after change in spatial orientation of picks // Eurasian Mining. 2019, no. 1, pp. 40—42. DOI: 10.17580/em.2019.01.10.
10. Габов В. В., Нгуен К. Л., Нгуен В. С., Ле Т. Б., Задков Д. А. Обоснование геометрических и режимных параметров шнековых исполнительных органов, обеспечивающих эффективность

погрузки угля на забойный конвейер // Уголь. — 2018. — № 2. — С. 32–35. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-2-32-35.

11. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. — М.: Наука, 1971. — 576 с.

12. Барон А. И., Ватолин Е. С., Койфман М. И. и др. Свойства горных пород при разных видах и режимах нагружения. — М.: Наука, 1984. — 276 с.

13. Jiang H. X., Meng D. G. 3D numerical modelling of rock fracture with a hybrid finite and cohesive element method // Engineering Fracture Mechanics. 2018, vol. 199, pp. 280–293. DOI: 10.1016/j.engfracmech. 2018.05.037.

14. Маметьев Л. Е., Хорешок А. А., Цехин А. М., Борисов А. Ю. Исследование взаимодействия режущего инструмента с угольным массивом // Горное оборудование и электромеханика. — 2018. — № 6. — С. 34–39. DOI: 10.26730/1816-4528-2018-6-34-39.

15. Liu W., Zhu X., Jing J. The analysis of ductile-brittle failure mode transition in rock cutting // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2018, vol. 163, pp. 311–319. DOI: 10.1016/j.petrol. 2017.12.067.

16. Rostamsowlat I., Richard T., Evans B. An experimental study of the effect of back rake angle in rock cutting // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018, vol. 107, pp. 224–232. DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2018.04.046.

17. Liu Xiaohui, Geng Qi Effect of contact characteristics on the self-rotation performance of conical picks based on impact dynamics modelling // Royal Society Open Science. 2020, vol. 7, no. 5, article 200362. DOI: 10.1098/rsos.200362.

18. Qiao Shuo, Xia Jingyi, Xia Yimin, Liu Zaizheng, Liu Jinshu, Wang Ailun Establishment of coal-rock constitutive models for numerical simulation of coal-rock cutting by conical picks // Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2019, vol. 63, no. 2, pp. 456–464. DOI: 10.3311/PPci.13084.

19. Zhou W. D., Wang H. T., Wang D. M., Zhang K., Du Y. H., Yang H. S. The effect of geometries and cutting parameters of conical pick on the characteristics of dust generation: Experimental investigation and theoretical exploration // Fuel Processing Technology. 2020, vol. 198, article 106243. DOI: 10.1016/j.fuproc.2019.106243.

20. 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. **ИТАБ**

REFERENCES

1. Pozin E. Z., Melamed V. Z., Ton V. V. *Razrushenie ugley vyemochnymi mashinami* [Coal cutting by winning machines], Moscow, Nedra, 1984, 288 p.

2. Pozin E. Z., Golovashkin Yu. B. Choice of effective schemes of cutter arrangement for auger executive bodies of harvesters. *Ugol'*. 1978, no. 2, pp. 46–51. [In Russ].

3. *Modelirovanie razrusheniya ugley rezhushchimi instrumentami*. Pod red. Yu. D. Krasnikova [Modelling of coal destruction by cutting tools, Krasnikov Yu. D. (Ed.)], Moscow, Nauka, 1981, 181 p.

4. Linnik Yu. N., Zhabin A. B., Linnik V. Yu., Polyakov A. V. Assessment of the impact of cutter and toolholder failures on the performance of coal-mining combines. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2018, no. 2, pp. 247–263. [In Russ].

5. Shabaev O. E., Bridun I. I. Diagnostic engineering of cutting heads of tunneling machines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. 9, pp. 94–101. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-9-0-94-101.

6. Zakharov V. N., Linnik Yu. N., Linnik V. Yu., Zhabin A. B. Optimisation of parameters of actuators of coal mining machines. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 4, pp. 44–47. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2020.04.11.

7. Gabov V. V., Zadkov D. A., Nguyen Khak Linh. Peculiarities of formation of elementary chips in the process of cutting coals and isotropic materials by a reference cutter of mining machines. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 236, pp. 153–161. [In Russ]. DOI: 10.31897.2019.2.153.

8. Zhabin A. B., Polyakov A. V., Averin E. A. Comparison of domestic and foreign methods of calculation of forces on frontal disc hammers during rock destruction. *Gornyi Zhurnal*. 2018, no. 12, pp. 65–68. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2018.12.13.

9. Zakharov V. N., Linnik V. Y., Linnik Y. N., Averin E. A. Loading of coal mining machine tools after change in spatial orientation of picks. *Eurasian Mining*. 2019, no. 1, pp. 40–42. DOI: 10.17580/em.2019.01.10.

10. Gabov V. V., Nguyen K. L., Nguyen V. S., Le T. B., Zadkov D. A. Justification of geometrical and mode parameters of auger executing bodies, providing efficiency of coal loading on the face conveyor. *Ugol'*. 2018, no. 2, pp. 32 – 35. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-2-32-35.
11. Mitropol'skiy A. K. *Tekhnika statisticheskikh vychisleniy* [Statistical computing techniques], Moscow, Nauka, 1971, 576 p.
12. Baron A. I., Vatin E. S., Koyfman M. I., etc. *Svoystva gornykh porod pri raznykh vidakh i rezhimakh nagruzheniya* [Properties of rocks under different types and modes of loading], Moscow, Nauka, 1984, 276 p.
13. Jiang H. X., Meng D. G. 3D numerical modelling of rock fracture with a hybrid finite and cohesive element method. *Engineering Fracture Mechanics*. 2018, vol. 199, pp. 280 – 293. DOI: 10.1016/j.engfracmech. 2018.05.037.
14. Mametyev L. E., Khoreshok A. A., Tsekhin A. M., Borisov A. Yu. Investigation of cutting tool interaction with coal massif. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2018, no. 6, pp. 34 – 39. [In Russ]. DOI: 10.26730/1816-4528-2018-6-34-39.
15. Liu W., Zhu X., Jing J. The analysis of ductile-brittle failure mode transition in rock cutting. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018, vol. 163, pp. 311 – 319. DOI: 10.1016/j.petrol. 2017.12.067.
16. Rostamsowlat I., Richard T., Evans B. An experimental study of the effect of back rake angle in rock cutting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018, vol. 107, pp. 224 – 232. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.04.046.
17. Liu Xiaohui, Geng Qi Effect of contact characteristics on the self-rotation performance of conical picks based on impact dynamics modelling. *Royal Society Open Science*. 2020, vol. 7, no. 5, article 200362. DOI: 10.1098/rsos.200362.
18. Qiao Shuo, Xia Jingyi, Xia Yimin, Liu Zaizheng, Liu Jinshu, Wang Ailun Establishment of coal-rock constitutive models for numerical simulation of coal-rock cutting by conical picks. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2019, vol. 63, no. 2, pp. 456 – 464. DOI: 10.3311/PPci.13084.
19. Zhou W. D., Wang H. T., Wang D. M., Zhang K., Du Y. H., Yang H. S. The effect of geometries and cutting parameters of conical pick on the characteristics of dust generation: Experimental investigation and theoretical exploration. *Fuel Processing Technology*. 2020, vol. 198, article 106243. DOI: 10.1016/j.fuproc.2019.106243.
20. OST 12.44.258-84. *Kombayny ochistnye. Vyor 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.

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 23.12.2023; получена после рецензии 06.02.2024; принята к печати 10.04.2024.

Received by the editors 23.12.2023; received after the review 06.02.2024; accepted for printing 10.04.2024.