

Исследование процесса разрушения калийной руды одним резцом с использованием перспективной схемы перекрестного резания

Д.И. ШИШЛЯННИКОВ¹ и И.Е. ЗВОНАРЕВ² ✉

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), Пермь, Россия

² Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

✉ Zvonarev_IE@pers.spmi.ru

Ссылка для цитирования оригинальной статьи: Shishlyannikov, D.; Zvonarev, I. Investigation of the Destruction Process of Potash Ore with a Single Cutter Using Promising Cross Cutting Pattern. *Appl. Sci.* 2021, 11, 464. <https://doi.org/10.3390/app11010464>

Аннотация: Создание современных машин и совершенствование существующих конструкций режущих органов горных комбайнов сдерживается отсутствием экспериментальных исследований процесса отделения последовательных элементарных трещин при резании калийной руды резцами выемочных машин. Показан потенциал схемы перекрестного резания калийной руды, поскольку формирование зон локализации ослабления и наведенных трещин на поверхности послойного забоя резания определяет отделение элементарных сколов со стабильными геометрическими параметрами. Проверка полученных теоретических выводов проводилась в ходе лабораторных испытаний на специально разработанном стенде. Методика исследований предусматривала проведение сравнительных испытаний нарезки руды калийного блока, шахматной и перекрестной нарезки. Доказано, что использование крестовой схемы задания параметров резания позволяет снизить удельные энергозатраты на резание калийной массы, уменьшить среднюю нагрузку на резец, среднеквадратичное отклонение и уменьшить количество труднообогатимых фракций в продуктах дробления по сравнению с традиционной шахматной схемой резания.

Ключевые слова: разрушение калийной руды; резание; схема перекрестного резания; экспериментальные исследования; лабораторный стенд.

Investigation of the Destruction Process of Potash Ore with a Single Cutter Using Promising Cross Cutting Pattern

Dmitriy I. SHISHLYANNIKOV¹ and Ivan E. ZVONAREV² ✉

¹ Perm National Research Polytechnic University (PNRPU), Perm, Russia

² Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

✉ Zvonarev_IE@pers.spmi.ru

Abstract: The creation of modern machines and improvement of existing designs of rock cutting bodies of combines is constrained by the lack of experimental studies of the process of separation of successive elementary cleavages during the potash ore cutting with cutters of winning machines. The potential of the cross cutting pattern of potash ore is shown, since the formation of zones of localization of weakening and induced fractures on the surface of layer-by-layer cutting face determines the separation of the elementary cleavages with stable geometric parameters. The verification of the conclusions obtained theoretically was carried out during laboratory tastings on a specially designed bench. The research procedure provided for comparative tests of the potash block ore cutting, staggered and cross cuttings. It has been proven that the use of the cross pattern for set cutting parameters makes it possible to reduce the specific energy costs of the cutting of potash mass, to reduce the average load on the cutter, to reduce the root-mean-square deviation, and to reduce the number of fractions that are hard to enrich in the crushing products, compared to the traditional staggered cutting pattern.

Keywords: destruction of potash ore; cutting; cross cutting pattern; experimental studies; laboratory bench.

1. Введение

Проблема повышения эффективности машинной добычи калийных и магниевых руд за счет снижения удельных энергозатрат на резание калийной руды резцами горных комбайнов и увеличения количества легкообогатимых фракций в руде остается актуальной для предприятий калийной промышленности России [1]. Решение этой задачи возможно при сбалансированном вкладе в разработку новых и совершенствование существующих конструкций режущих элементов горных комбайнов, используемых при добыче калийных и магниевых руд [2, 3].

* Перевод подготовлен для повышения интереса русскоязычной аудитории к данной статье.

© 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

© Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (перевод), 2025.

В настоящее время на калийных рудниках России и стран СНГ наиболее широко используются отечественные проходческие комбайны «Урал», выпускаемые на Копейском машиностроительном заводе (г. Копейск, Россия). Однако следует отметить, что конструкция этих машин не претерпевала принципиальных изменений уже более 40 лет [4].

Создание современных машин, оснащенных рабочими органами, отвечающими современным стандартам производительности, сдерживается отсутствием исследований процесса разделения последовательных элементарных спаев при резании калийной руды резцами выемочных машин [5].

2. Теоретические исследования процесса резания калийной руды поперечными резцами

Одним из преимуществ планетарно-дисковых рабочих органов является создание сетки пересекающихся резов на поверхности выбуренной породы [6, 7]. Существуют научные исследования сотрудников Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ), Карагандинского научно-исследовательского угольного института (КНИУИ), Московского горного института (МГМИ) и Гипроуглемаш, где можно найти результаты исследований схемы перекрестного резания блоков калийной руды [8-13].

При реализации схемы перекрестного резания каждый следующий слой массива срезается таким образом, чтобы эти срезы пересекались со срезами предыдущего слоя под определенным углом. Слой, разрушаемый резцами, установленными на одном диске специального планетарно-дискового элемента проходческой машины, называется рабочим слоем горной массы [14, 15].

Ниже будут описаны теоретические основы механизма разрушения породы калийной руды поперечными резцами (рис. 1). В качестве режущего элемента используется резец с прямоугольной кромкой и плоской передней поверхностью (как наиболее эффективный для перекрестного резания) [16].

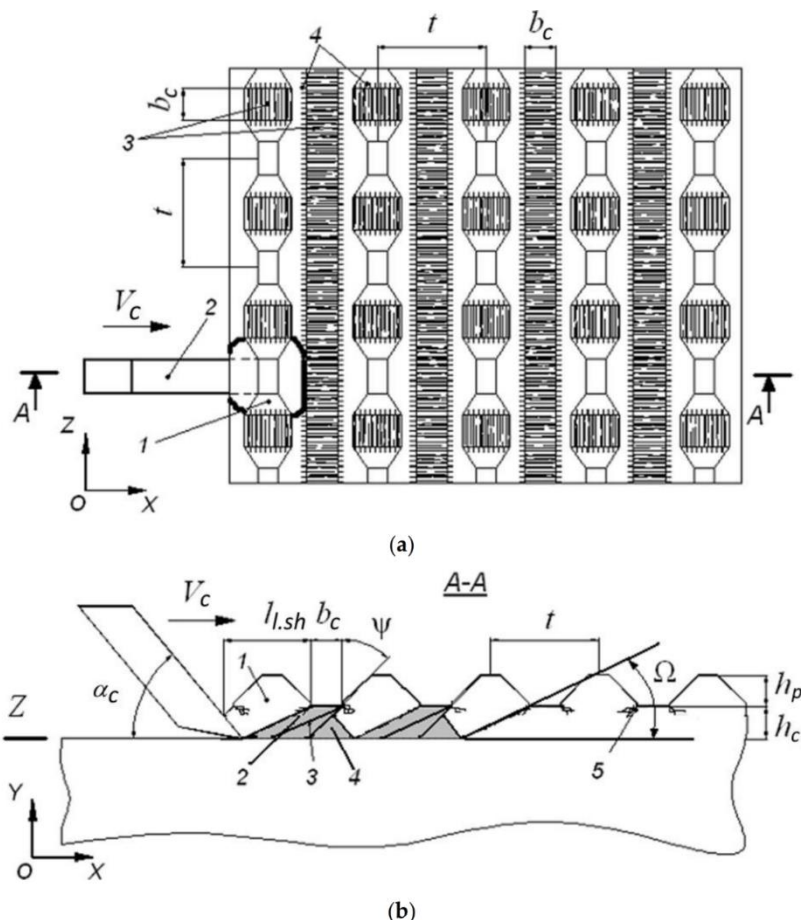


Рис. 1. Схема отделения последовательных элементарных сколов от калийного массива при разрушении поперечными штреками:

(а) – забой разрушения поперечными штреками: 1 – крупная элементарная трещина; 2 – резчик; 3 – пересекающиеся резы; 4 – зоны концентрации трещин;

(б) – схема отделения элементарных сколов от калийного массива при движении резца поперек резов отработанного слоя: 1 – крупный элементарный скол; 2, 3, 4 – мелкие промежуточные сколы; 5 – зоны концентрации напряжений и трещин

Резец (угол резания α_c , ширина режущей кромки b_c) движется со скоростью V_c поперек резов отработанного слоя массива в плоскости резания Z . Резец углублен по отношению к срезам эксплуатируемого слоя на величину h_c . Общая толщина скалывания h определяется по уравнению (1):

$$h = h_c + h_p, \quad (1)$$

где h_c – величина заглупления пересекающихся забоев по отношению к забою эксплуатируемого слоя, мм; h_p – высота выступа, мм.

Резы каждого слоя образуют на поверхности забоя пересекающиеся зоны концентрации напряжений и локализации техногенных трещин. Практическое расположение зон наведенных трещин определяется величиной рационального шага резания $t_{r.s.}$ перекрестного и сонаправленного резания.

Резец проникает в калийную массу на этапе отбойки породы, при этом происходит дробление и пластическая деформация определенного объема руды. В предрезцовом пространстве формируется зона напряженного состояния. Реализация традиционных схем резания [17] характеризуется образованием крупных элементов-сколов, которые получаются при создании и развитии магистральных трещин в зоне контакта передней кромки резца с калийным массивом. При разрушении калийной руды перекрестными резами происходит встречное распространение имеющихся в массе поперечных сдвиговых трещин («стартовых» трещин), сосредоточенных по периметру основания образовавшегося выступа, при условии, что шаг резания меньше или равен рациональному шагу перекрестного резания ($t \leq t_{r.s.}$). Формирование поверхностей разрушения элементарных сколов за счет развития наведенных трещин, имеющихся в массиве, определяет снижение усилий, необходимых для осуществления скола. Кроме того, уменьшается объем ядра уплотнения (состоит из мелких частиц раздробленной породы) и зоны неупругого деформирования руды [18].

Таким образом, практическое формирование забоя по схеме перекрестного резания с рациональным шагом $t_{r.s.}$ обуславливает снижение удельных энергозатрат механизма разрушения калийной руды, уменьшение выхода мелких пылевидных фракций и увеличение количества крупных сформированных сколов в разрушенной руде.

Если задача решается приближенно, то уравнение для определения рационального шага резания $t_{r.s.}$ при реализации схемы перекрестного резания имеет следующий вид:

$$t_{r.s.} = l_{l.sh.} + b_c = h_c \cdot (\tan\omega + \tan\alpha_c) + b_c \approx 5 \dots 7h_c, \quad (2)$$

где $l_{l.sh.}$ – крупного элементарного скола устойчивой формы, мм; ω – угол между плоскостью резания и нижней поверхностью разрушения крупного элементарного скола длиной $l_{l.sh.}$, град.

Между сонаправленными резами при $t \leq t_{r.s.}$ образуются регулярные выступы устойчивой формы. Перемещение резца на шаг резания t приводит к отделению одной крупной спайки от массы при реализации схемы перекрестного резания (рис. 1, позиция 1). Частота появления крупных сколов f_1 (Гц) при постоянной скорости резания V_c определяется уравнением (3):

$$f_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{V_c}{t}, \quad (3)$$

где T_1 – время смещения резца на шаг резания t , с.

Разрушение участков массива, расположенных между регулярными выступами, образованными сонаправленными резами, осуществляется путем образования промежуточных сколов (см. рис. 1б, позиции 2, 3, 4). Количество промежуточных сколов на один крупный скол определяется шириной кромки b_c резца и величиной его заглупления h_c в массив. Параметры промежуточных сколов случайны. Их отделение от массы сопровождается дроблением и пластической деформацией руды. Частота появления промежуточных сколов f_2 (Гц) определяется по уравнению (4):

$$f_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{V_c}{3b_c} \cdot \frac{b_c}{h_c} = \frac{V_c}{3h_c}, \quad (4)$$

где T_2 – время появления мелких промежуточных расщеплений, с.

Проверка результатов вышеупомянутых теоретических исследований может быть осуществлена путем проведения экспериментальных исследований на лабораторном стенде, где калийная руда разрушается одним резцом [19-21].

3. Исследование механизма разрушения породы калийной руды одним резцом

Сотрудники кафедры машиностроения Санкт-Петербургского горного университета разработали и изготовили стенд (рис. 2) для экспериментального исследования механизма разрушения породы калийной массы одним резцом [16, 22].

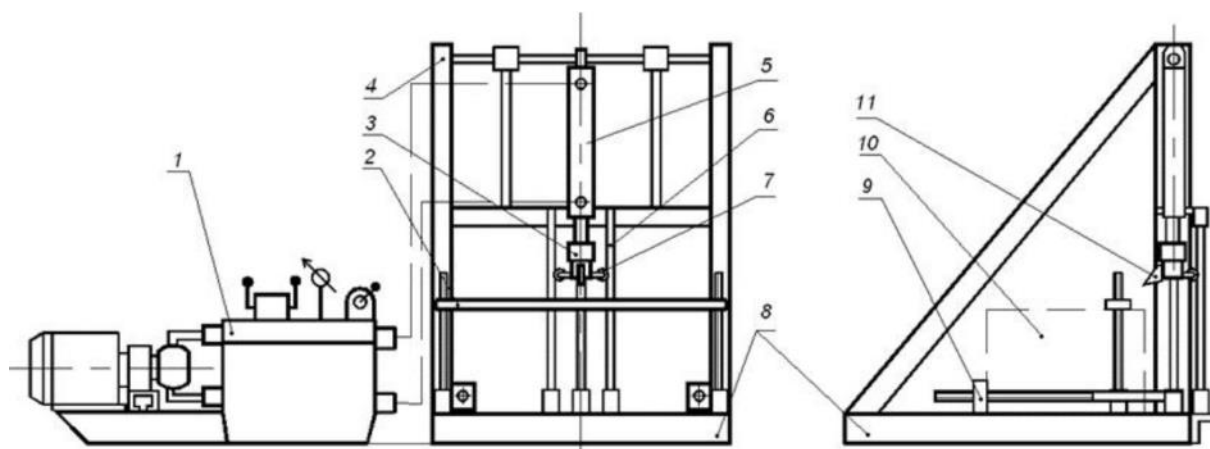


Рис. 2. Лабораторный стенд для измельчения калийной руды методом резания

Стенд включает в себя основание 8, на котором расположена сварная рама 4 (соединенная сварными швами и укосинами). На раме 4 жестко закреплен гидравлический двухсторонний силовой цилиндр 5, соединенный с измерительным гидроцилиндром 3, в котором расположен резец 11. Подача рабочей жидкости (масло И-20А) в полости гидроцилиндра 5 осуществляется насосной станцией 1. К измерительному гидроцилиндру 3 подключен индикатор давления для измерения силы резания P_z на резце 11.

Для обеспечения прямолинейного движения резца 11 в конструкции стенда предусмотрены три вертикальные направляющие 6, по которым могут перемещаться ролики 7 измерительного гидроцилиндра 3. На основание 8 устанавливается блок калийной руды 10 и фиксируется в неподвижном положении зажимами 2 и 9. Шаг и углубление резания задаются перемещением блока 10 [16, 22].

Гидравлическая система стенда (рис. 3) состоит из двух шестеренчатых насосов 3 и 16, приводимых в действие трехфазным асинхронным двигателем 1 через редуктор 2. Рабочая жидкость подается из масляного бака 12 в полости силового гидроцилиндра 13, шток которого соединен с измерительным гидроцилиндром 14 и резцом 15. Диаметр поршня измерительного гидроцилиндра составляет 40 мм. Направление движения фрезы определяется переключением золотника 11, а скорость поступательного движения регулируется регулятором расхода 9.

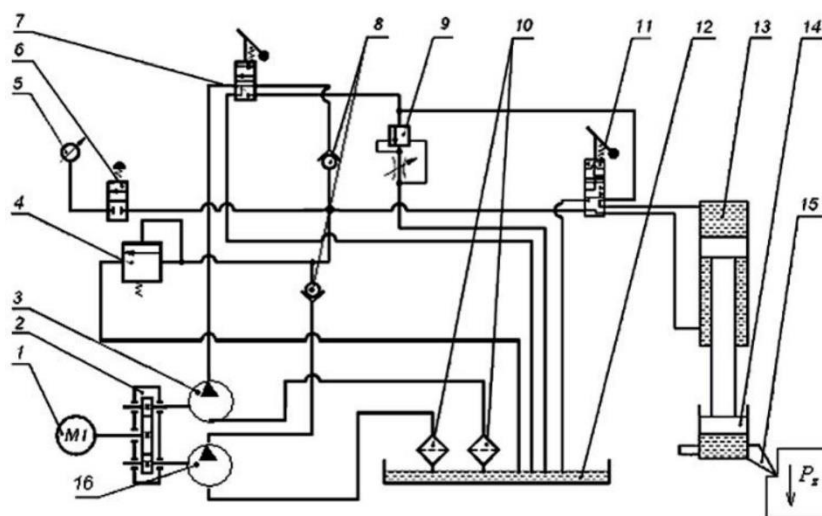


Рис. 4. Гидравлическая система стенда

Расширение диапазона скорости подачи фрезы 15 при проходке в разрушенный блок возможно за счет работы одного или двух шестеренчатых насосов. Шестеренчатый насос 16 управляется золотником 7. Для защиты системы от перегрузок предусмотрен предохранительный клапан 4. Давление контролируется манометром 5, подключенным к напорному трубопроводу через золотник 6. Кроме того, имеются клапаны обратного потока 8 и фильтры 10 для очистки рабочей жидкости в гидравлической системе. Общий вид стенда показан на рисунке 4.

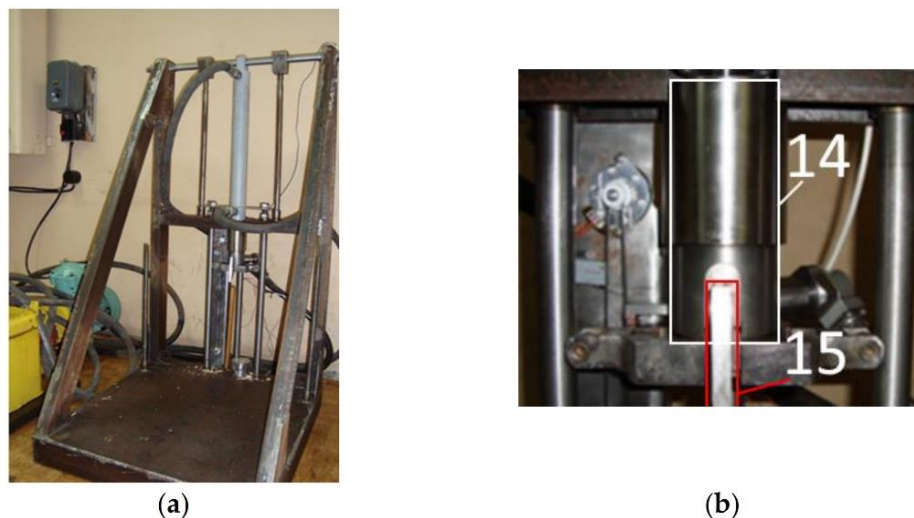


Рис. 4. Общий вид стенда (а) и (б) измерительный гидроцилиндр 14 с фрезой 15, индикаторы давления и перемещения

К цилиндру 14 (см. Рис. 3) подсоединен индикатор давления, давление в котором пропорционально силе резания P_z . Скорость подачи фрезы 15 контролируется индикатором перемещения – энкодером. Частота дискретизации индикаторов составляет 0,5 кГц. Данные с измерительных индикаторов записываются и преобразуются многоканальным устройством-регистратором АЦП/ЦАП и обрабатываются на персональном компьютере с помощью специализированного программного обеспечения с использованием известных методов математической статистики, корреляции и спектрального анализа.

Параметры образцов, взятых для экспериментальных исследований:

- форма: кубоид с размерами 300 x 300 x 600 мм;
- происхождение: ПАО «Уралкалий», Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей, пласт «Красный-П»;
- сопротивление резанию $A_c = 400 \dots 430$ Н/мм [23].

Породоразрушающий инструмент представляет собой резец с плоской передней поверхностью и прямоугольной режущей кромкой. Ширина режущей кромки $b_c = 10$ мм, угол резания $\alpha_c = 50^\circ$, угол зазора $\beta_c = 5^\circ$. Гидравлический привод резца обеспечивает среднюю скорость $V_c = 0,1$ м/с. Типы резания: с выровненной поверхности, шахматное и перекрестное.

Отделенная от блока руда собиралась с помощью пылеудаления, затем взвешивалась и просеивалась для определения гранулометрического состава. Крупные расколы руды отбирались вручную. Удельные энергозатраты на процесс отбойки породы рассчитывались по уравнению (5):

$$H_w = \frac{P_{zc} L \gamma_k}{3600G}, \quad (5)$$

где H_w – удельные энергозатраты на процесс разрушения блока калийной руды одним резцом, кВт·ч/т; P_{zc} – среднее усилие резания на одном резце, Н; γ_k – плотность калийной руды в блоке, т/м³; G – масса отделенной от блока руды (масса горной крошки), кг.

По уравнениям (6) и (7) были рассчитаны значения среднего усилия резания на одном резце и его среднеквадратичное (стандартное) отклонение:

$$P_{zc} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{zi}; \quad (6)$$

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (P_{zi} - P_{zc})^2}, \quad (7)$$

где P_{zi} – мгновенное значение силы резания на одном резце, Н; n – количество интервалов выборки; σ_p – среднеквадратичное (стандартное) отклонение силы резания, Н.

4. Результаты экспериментальных исследований

Разрушение калийной руды одним резцом представляет собой сложный многофакторный циклический процесс чередования фаз контактного дробления и образования крупных сколов. Отделение каждого крупного скола от массы сопровождается образованием шара давления и неупругой деформацией калийной руды. Продукты разрушения содержат как крупные элементы, так и пылевидные частицы.

Параметры движущей силы механизма разрушения породы образцов резами с выровненной поверхности анализировались по трем осциллограммам (рис. 5а), полученным при равных условиях ($h = 10$ мм, $t/h > 7,2$). Среднее значение силы резания составило $P_{zl} = 2400$ Н, что позволило определить сопротивление резанию A_c испытуемого блока калийной руды.

$$A_c = \frac{P_{zl}}{hk_b} = \frac{P_{zl}}{h(0.16 + 0.042b_p)} = \frac{2400}{10(0.16 + 0.042 \cdot 10)} = 414 \text{ N/mm}, \quad (8)$$

где k_b – коэффициент влияния ширины режущей кромки. Значение коэффициента k_b определяется эмпирически. Он характеризует разницу между геометрическими параметрами фрезы, используемой в данных исследованиях, и параметрами эталонной фрезы, которая используется для определения сопротивления резанию A_c в известных подходах.

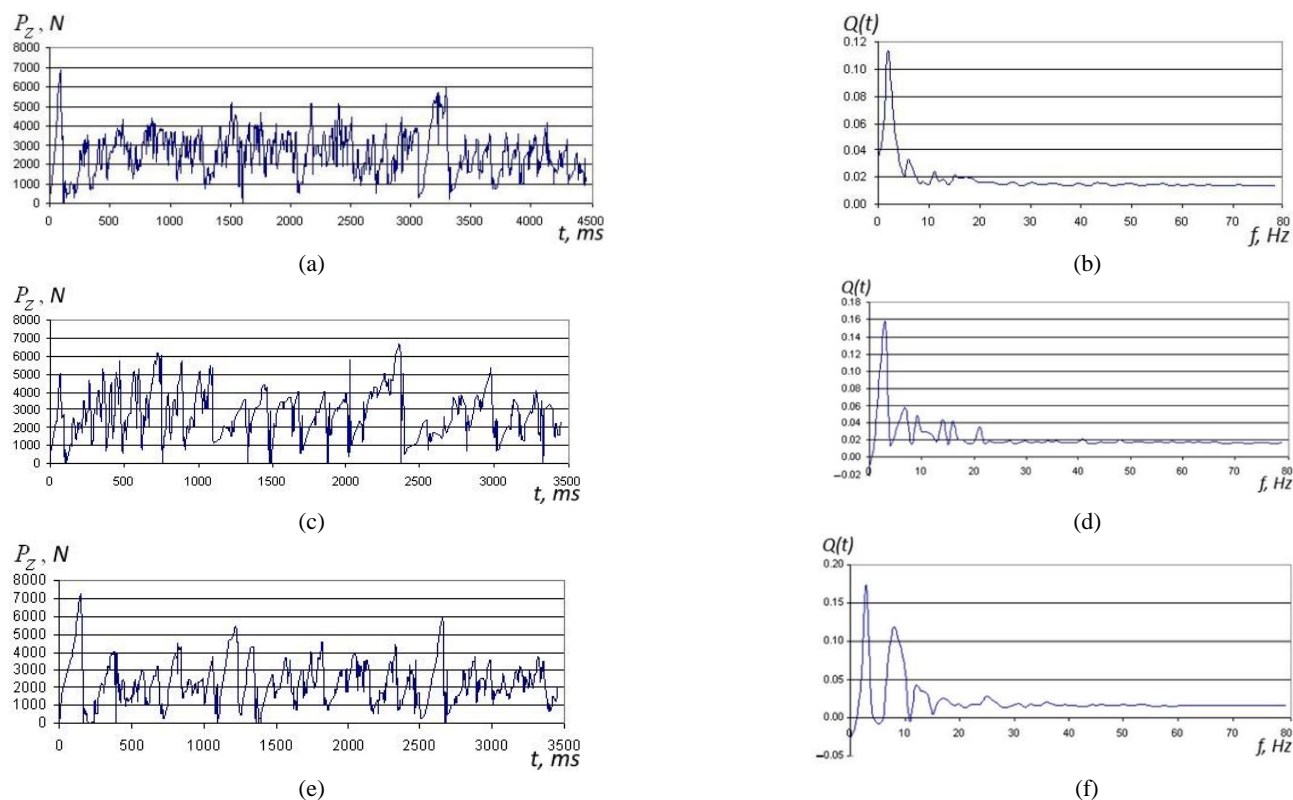


Рис. 5. Изменение силы резания P_z (a,c,e) и спектральной плотности $Q(t)$ силы резания (b,d,f) при разрушении образцов одним резцом: a,b – резка с выровненной поверхности; c,d – шахматная резка; e,f – поперечная резка

Сравнение значения сопротивления резанию A_c , полученного экспериментально, с известными значениями, определенными сотрудниками ВНИИ галургических отраслевых исследований сильвинита рудника БКПРУ-4, подтверждает высокую достоверность экспериментальных результатов [23].

Спектральная плотность позволяет оценить частотное распределение силы резания. На рисунке 5b имеется изолированный всплеск спектра на частоте 2 Гц, который характеризует частоту образования крупных сколов при резании.

Методика исследования позволяет определить гранулометрический состав породоразрушающего механизма калийной руды при резании с выровненной поверхности и рассчитать удельные энергозатраты на процесс резания. Результаты сортировки руды, выделенной из блока, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Гранулометрический состав калийной руды, выделенной из пробы при стендовых испытаниях

Размеры граничных частиц, мм	Массовое содержание фракций					
	Резы с выровненной поверхности		Шахматные резы		Перекрестные резы	
	грамм	%	грамм	%	грамм	%
≥5	56,46	71,91	124,00	75,99	99,40	72,92
3–5	3,20	4,07	5,60	3,43	6,30	4,81
1–3	9,60	12,22	14,55	8,92	12,80	9,78
0,5–1	3,60	4,58	8,40	5,15	6,07	4,64
0,25–0,5	2,77	3,53	5,82	3,57	4,13	3,15
≤0,25	2,90	3,69	4,80	2,94	2,23	1,70
Всего	78,53	100	163,17	100	130,93	100

Величина среднеквадратичного отклонения силы резания при отбойке образца калийной руды резанием с выровненной поверхности при $h = 10$ мм составила $\sigma_{cl} = 1045,8$ Н. Удельные энергозатраты механизма породоразрушения калийной руды резанием с выровненной поверхности составляют $H_{wl} = 3,6$ кВт·ч/м³, что соответствует результатам ранее выполненных аналогичных исследований [11].

Исследование механизма разрушения породы калийной руды проводилось по шахматной схеме с шагом резания $t = 35$ мм и глубиной резания по отношению к слою предыдущих резов $h_c = 5$ мм (общая толщина скола $h = 10$ мм). Отчетные вырубки проводились с поверхности (предварительно сформированной), характерной для шахматной схемы резания. Параметры механизма разрушения породы образцов шахматным резанием анализировались по трем осциллограммам, полученным при равных условиях (см. рис. 5в). Среднее значение силы резания составило $P_{zs} = 2564,8$ Н, удельные затраты энергии процесса разрушения калийного массива шахматным резанием – $H_{ws} = 1,72$ кВт·ч/м³, что соответствует результатам, полученным авторами работы [10] при аналогичных исследованиях.

На рисунке 5d виден обособленный скачок спектра на частоте 3 Гц, который характеризует частоту образования крупных сколов в срезе. Значение среднеквадратичного отклонения силы резания при резании образца калийной руды шахматными резами при $h = 10$ мм составило $\sigma_{cs} = 1045,8$ Н.

Результаты анализа гранулометрического состава калийной руды, выделенной из разрушенного блока шахматными резами (см. табл. 1), показывают, что применение шахматной схемы резания позволяет несколько снизить количество мелких труднообогатимых фракций размером «–0,25» в продуктах отбойки по сравнению с резанием по методу выровненной поверхности (с 3,69 % до 2,94 %).

Изучение механизма разрушения породы калийной руды проводилось по перекрестной схеме с шагом резания $t = 35$ мм и глубиной резания по отношению к слою предыдущих резов $h_c = 5$ мм (общая толщина скола $h = 10$ мм). Отчетные резы проводились с поверхности (предварительно сформированной), характерной для перекрестной схемы резания.

Параметры движущей силы породоразрушающего механизма образцов при перекрестном скалывании анализировались по трем осциллограммам (рис. 5d), полученным при равных условиях. Среднее значение силы резания составило $P_{zc} = 1910$ Н, среднеквадратичное отклонение силы резания – $\sigma_{cc} = 1045,8$ Н, удельные энергозатраты породоразрушающего механизма калийной массы при перекрестном резании – $H_{wc} = 1,46$ кВт·ч/м³.

На рисунке 5f наблюдаются обособленные скачки спектра на частотах 3 Гц и 8 Гц. На частоте 3 Гц происходит образование крупных сколов стабильной формы, на частоте 8 Гц образуются мелкие промежуточные сколы. Гранулометрический состав продуктов разрушения рудного блока при перекрестном резании представлен в табл. 1. Сводные нагрузочные и энергетические характеристики процесса резания калийной руды одним резцом для каждого эксперимента приведены в табл. 2.

Таблица 2

Грузоподъемные и энергетические характеристики процесса резания калийной руды одним резцом

Номер реза	Резы с выровненной поверхности			Шахматные резы			Перекрестные резы		
	P_{zl}	σ_{cl}	H_{wl}	P_{zs}	σ_{cs}	H_{ws}	P_{zc}	σ_{cc}	H_{wc}
1	2510,3	1061,6	3,80	2677,1	1313,5	1,70	1850,1	1051,9	1,43
2	2430,8	1058,1	3,69	2437,4	1318,8	1,78	1967,5	1122,5	1,48
3	2258,9	1017,7	3,31	2579,9	1268,6	1,68	1922,4	1105,2	1,47
Среднее значение	2400,0	1045,8	3,60	2564,8	1300,3	1,72	1910,0	1093,2	1,46

Относительная погрешность экспериментальных данных не превышает 10 %. Таким образом, снижение удельных энергозатрат на процесс перекрестного резания с параметрами резания $b_c = 10$ мм, $h = 10$ мм, $t = 35$ мм по сравнению со шахматной схемой составляет:

$$\left(1 - \frac{H_{wc}}{H_{ws}}\right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{1.46}{1.72}\right) \cdot 100\% = 15\%, \quad (9)$$

где H_{wc} – удельные энергозатраты механизма разрушения породы образца при перекрестном резании, $H_{wc} = 1,46$ кВт·ч/м³; H_{ws} – удельные энергозатраты механизма разрушения породы образца при шахматном резании, $H_{ws} = 1,72$ кВт·ч/м³. Снижение средних нагрузок на резец при использовании схемы перекрестного резания по сравнению с шахматной схемой составляет

$$\left(1 - \frac{P_{zc}}{P_{zs}}\right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{1910}{2564.8}\right) \cdot 100\% = 34\%, \quad (10)$$

где P_{zc} – средняя сила резания при перекрестном резании калийной массы, $P_{zc} = 1910$ Н; P_{zs} – средняя сила резания при шахматном резании калийной массы, $P_{zs} = 2564,8$ Н.

Уменьшение среднеквадратичного отклонения нагрузок на резец при реализации схемы перекрестного резания по сравнению со шахматной схемой составляет

$$\left(1 - \frac{\sigma_{cc}}{\sigma_{cs}}\right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{1093.2}{1300.3}\right) \cdot 100\% = 16\%, \quad (11)$$

где σ_{cc} – дисперсия нагрузок на резец при реализации схемы перекрестного резания, $\sigma_{cc} = 1093,2$ Н; σ_{cs} – дисперсия нагрузок на резец при реализации схемы шахматного резания, $\sigma_{cs} = 1300,3$ Н.

Уменьшение количества труднообогатимых фракций размера «-0,25» при реализации схемы перекрестного резания по сравнению со шахматной схемой составляет

$$\left(1 - \frac{M_{-0.25c}}{M_{-0.25s}}\right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{1.7}{2.94}\right) \cdot 100\% = 42\%, \quad (12)$$

где $M_{-0.25c}$ – массовое содержание труднообогатимых фракций при реализации метода перекрестной резки, $M_{-0.25c} = 1,7$ %; $M_{-0.25s}$ – массовое содержание труднообогатимых фракций при реализации метода шахматной резки, $M_{-0.25s} = 2,94$ %.

Расчетные частоты образования крупных стабильных и мелких промежуточных расщеплений, в соответствии с уравнениями (3) и (4), составляют:

$$f_1 = \frac{V_c}{t} = \frac{0.1}{0.035} = 2.86 \text{ Hz}; \quad (13)$$

$$f_2 = \frac{V_c}{3h_c} = \frac{0.1}{0.015} = 6.67 \text{ Hz.} \quad (13)$$

Рассчитанные значения частот близки к экспериментально полученным (см. рис. 5d), которые составили 3 Гц и 8 Гц соответственно.

5. Выводы

Результаты теоретических и экспериментальных исследований перспективной схемы перекрестного резания показали следующее:

- Элементарные сколы, развивающиеся при резании калийной рудной массы поперечным резанием, образуются за счет распространения главных поперечных трещин сдвига, а не отрыва, что характерно для образования сколов при резании с выровненной поверхности или шахматном резании. Эти факты обуславливают снижение силовых и энергетических параметров резания калийной рудной массы при реализации схемы перекрестного резания по сравнению с традиционными схемами.
- Формирование пересекающихся областей локализации наведенных трещин и концентрации напряжений на поверхности калийной массы приводит к выделению крупных элементарных сдвигов устойчивой формы, что обуславливает повышение качества гранулометрического состава калийной руды при реализации схемы перекрестного резания по сравнению со шахматной [24].
- Реализация схемы перекрестного резания по сравнению со шахматной при заданных параметрах резания (шаг резания $t = 35$ мм, общая толщина среза $h = 10$ мм, глубина резания по отношению к слою предыдущих срезов $h_c = 5$ мм, ширина режущей кромки $b_c = 10$ мм) позволяют снизить удельные энергозатраты на измельчение калийной рудной массы на 15 %, уменьшить средние нагрузки на резец на 34 %, среднеквадратичное отклонение нагрузок на 16 %, а также уменьшить количество труднообогатимых фракций в продуктах дробления на 42 %.

Полученные результаты позволяют обосновать рациональные параметры планетарно-дисковых рабочих органов, разрушающих калийную массу поперечным резанием. Результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса формирования последовательных элементарных сколов, составляющих резание, способствуют поиску неявных путей повышения эффективности машинной добычи калийных руд и обеспечивают создание проходческо-очистных комбайнов с современными стандартами производительности [5].

Вклад авторов: концептуализация, Д.С.; методология, Д.С. и И.З.; исследование, Д.С. и И.З.; формальный анализ, Д.С. и И.З.; ресурсы, Д.С.; валидация, Д.С.; визуализация, Д.С. и И.З.; написание – подготовка первоначального проекта, Д.С.; написание – рецензирование и редактирование, И.З. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Финансирование: Данное исследование не получало внешнего финансирования.

Заявление Совета по институциональному надзору: Не применимо.

Заявление об информированном согласии: Не применимо.

Заявление о доступности данных: Данные содержатся в статье или дополнительных материалах. Данные, представленные в настоящем исследовании, доступны в работе «Шишляников Д.И. Повышение эффективности сепарации калийной руды из массива резами горных комбайнов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, 2012».

Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gabov, V.V.; Zadkov, D.A.; Kuzkin, A.Y.; Elikhin, A.S. Fractured-laminar structure of formations and methods of coal. *Key Eng. Mater.* 2020, 836, 90–96. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.836.90>
2. Ivanov, S.L.; Ivanova, P.V.; Kuvshinkin, S.Y. Promising model range career excavators operating time assessment in real operating conditions. *J. Min. Inst.* 2020, 242, 228–233. <http://doi.org/10.31897/pmi.2020.2.228>
3. Lavrenko, S.A.; Korolev, I.A. Analysis of cambrian clay cutting during Saint-Petersburg subway construction. *Gorn. Zhurnal* 2018, 1, 53–58. <http://doi.org/10.17580/gzh.2018.02.08>
4. Starkov, L.I.; Zemskov, A.N.; Kondrashev, P.I. *Development of Mechanized Mining of Potash Ores*; PGU: Perm, Russia, 2008; p. 522.

5. Urazbakhtin, R.Y.; Yungmeister, D.A. The results of studies of the tunneling rescue complex for coal mines. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2019, 560, 012130. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/560/1/012130>
6. Chekmasov, N.V.; Nemtsev, V.A. Substantiation of the directions of improvement of road heading machines. *PNIPU Bull. Geol. Oil Gas Min.* 2005, 6, 238–239.
7. Yang, Y.; Zhang, C.; Lin, M.; Chen, L. Research on rock-breaking mechanism of cross-cutting PDC bit. *J. Petrol. Sci. Eng.* 2018, 161, 657–666. <http://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.11.034>
8. Lukin, D.G.; Yungmeister, D.A.; Yacheikin, A.I.; Isaev, A.I. Improvement of shield machine KT1-5.6M cutterhead operation. *Gorn. Zhurnal* 2018, 12, 73–77. <http://doi.org/10.17580/gzh.2018.12.15>
9. Polyakov, S.V.; Pushkarev, A.E. Parameters determining differences between geometric and mechanical properties of spiral elements in rope, affecting development of emergency situations. In Proceedings of the GFAC 2019, Saint Petersburg, Russia, 6–8 February 2019; pp. 270–273. <http://doi.org/10.1201/9780429058882-53>
10. Solod, V.I.; Getopanov, V.N.; Rachek, V.M. *Design and Construction of Mining Machines and Complex*; Nedra: Moscow, Russia, 1982; p. 350.
11. Starkov, L.I.; Kharlamova, N.A. Cross-cut pattern study. *Min. J. Proc. High. Educ. Inst.* 1997, 7–8, 74–76.
12. Sveshnikov, I.A.; Mishnyaevskij, L.L. Study of the step bottom of hole in rotary drilling with carbide inserts bits. *Sverkhtrverdye Mater.* 1992, 1, 51–56.
13. Zhabin, A.B.; Polyakov, A.V.; Averin, E.A.; Linnik, Y.N.; Linnik, V.Y. Estimation of abrasiveness impact on the parameters of rock-cutting equipment. *J. Min. Inst.* 2019, 240, 621–627. <http://doi.org/10.31897/PMI.2019.6.621>
14. Lavrenko, S.A.; Yungmeister, D.A.; Igorevich, S.D.; Iusupov, G.A. Simulation of the process of destruction of the array of Cambrian clays by cutters actuating device of sinking machinery in terms of OJSC «Metrostroy», St. Petersburg. *Int. J. Appl. Eng. Res.* 2015, 10, 16409–16417.
15. Wu, D.P.; Yang, X.A.; He, Z.S.; Cao, L. Study on eccentric wear mechanism of pick-shaped cutter in soft and hard interbedded formation tunnel. *Appl. Mech. Mater.* 2014, 501–504, 1668–1671. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.501-504.1668>
16. Shishlyannikov, D.I. Increasing the Efficiency of Separating Potash Ore from the Massif with Cutters of Mining Combines. Ph.D. Thesis, Engineering Sciences, Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia, 2012.
17. Xuan, N.V.; Linh, N.; Gabov, V.V.; Lykov, Y.V. Relocation schemes of picks with cutting, coupling and group cuts on shearer cutting drums. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2019, 378, 012022. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/378/1/012022>
18. Zhu, J.; Zhai, T.; Liao, Z.; Yang, S.; Liu, X.; Zhou, T. Low-amplitude wave propagation and attenuation through damaged rock and a classification scheme for rock fracturing degree. *Rock Mech. Rock Eng.* 2020, 53, 3983–4000. <http://doi.org/10.1007/s00603-020-02162-8>
19. Ji, Y.J.; Li, R.K. DEM simulation study of crosscutting speed for the cutting header. *Appl. Mech. Mater.* 2014, 470, 188–192. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.470.188>
20. Zhang, Z.; Zhang, K.; Dong, W.; Zhang, B. Study of rock-cutting process by disc cutters in mixed ground based on three-dimensional particle flow model. *Rock Mech. Rock Eng.* 2020, 53, 3485–3506. <http://doi.org/10.1007/s00603-020-02118-y>
21. Zhu, Q.-Z.; Shao, J.-F. A semi-empirical failure criterion for brittle rocks. *Rock Mech. Rock Eng.* 2020, 53, 4271–4277. <http://doi.org/10.1007/s00603-020-02125-z>
22. Zadkov, D.A.; Gabov, V.V.; Nguyen, K.L. Features of elementary burst formation during cutting coals and isotropic materials with reference cutting tool of mining machines. *J. Min. Inst.* 2019, 236, 153–161. <http://doi.org/10.31897/pmi.2019.2.153>
23. Heading-and-Cleaning Combines for the Extraction of Potash Ores. *Selection of Destination Indicators and Calculation of Rock Destruction Parameters*; VNIIG: Leningrad, Russia, 2008; p. 31.
24. Lipnitsky, N.A.; Kuskova, Y.V. Complex approach to the development of potash, potassium-magnesium and salt deposits. *E3S Web Conf.* 2018, 41, 01005. <http://doi.org/10.1051/e3sconf/20184101005>