

СТЕНД ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД РЕЗАНИЕМ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НА НЕМ БЛОКОВ КАЛИЙНОЙ РУДЫ

Д.И. Шишлянников¹, Д.С. Грибов², К.А. Просовский², И.Х. Тюбеев¹, Д.А. Ситников¹

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

² АО «ВНИИ Галургии», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: dmitriy.gribov@mail.ru

Аннотация: Приведены основные сведения о разрушении горных пород резами добычных машин. Указано, что данный процесс стоит рассматривать как случайный, описываемый соответствующими характеристиками, количественная оценка которых возможна посредством использования экспериментального метода исследований, например, на лабораторных стендах. Таким образом, задача разработки и создания лабораторных стендов, с помощью которых можно экспериментально исследовать процесс разрушения горных пород резанием, является актуальной научной задачей и представляет практический интерес. Описаны методика и стенд для определения силовых и энергетических параметров процесса разрушения горных пород одиночным резцом. Показано, что основным параметром, влияющим на процесс резания, является отношение шага резания к толщине стружки. Приведены результаты стендовых испытаний процесса разрушения блоков калийной руды одиночным резцом, которые позволили определить зависимости изменения средних сил резания на одиночном резце, удельных затрат энергии и массовой доли классов крупностью «-0,25 мм» в продуктах разрушения от толщины стружки. Выявлен оптимальный диапазон отношения шага резания к толщине стружки, при котором наблюдается минимум удельных затрат энергии при разрушении блоков калийной руды одиночным резцом.

Ключевые слова: лабораторный стенд, резец, горная порода, калийная руда, схема резания, удельные затраты энергии, сила резания, шаг резания, толщина реза, сопротивляемость резанию.

Благодарность: Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № ФСНМ-2023-0005).

Для цитирования: Шишлянников Д. И., Грибов Д. С., Просовский К. А., Тюбеев И. Х., Ситников Д. А. Стенд для разрушения горных пород резанием и результаты исследования на нем блоков калийной руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 10. – С. 78–91. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_10_0_78.

Test bench and studies of rock fracture mechanism in cutting potassium blocks

D.I. Shishlyannikov¹, D.S. Gribov², K.A. Prosovskiy², I.H. Tyubeev¹, D.A. Sitnikov¹

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

² JSC «VNIIGalurgii», Saint-Petersburg, Russia, e-mail: dmitriy.gribov@mail.ru

Abstract: The article gives essential elements of information on rock fracture by mining cutter picks. This process should be considered as a random process described by the associated characteristics which are possible to evaluate quantitatively using an experimental method of research, for instance, bench testing. Accordingly, design and manufacture of test benches for the experimental analysis of rock fracture process in cutting is a relevant theoretical and practical problem. The test bench and procedure of determining force and energy parameters of rock fracture by a single cutting pick are described. It is shown that the main parameter that influences the process of cutting is a ratio of the pick spacing to the depth of cut. The bench testing results on fracture of potassium blocks by a single cutting pick allowed determining the average cutting force on the single pick, the specific energy input and the mass fraction of particle size of -0.25 mm against the depth of cut. The optimum range of the pick spacing/depth of cut ratio at the minimum specific energy in fracture of potassium blocks by a single cutting pick is identified.

Key words: laboratory test bench, cutting pick, rock, potassium ore, cutting pattern, specific energy input, cutting force, pick spacing, depth of cut, cutting resistance.

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Project No. FSNM-2023-0005).

For citation: Shishlyannikov D. I., Gribov D. S., Prosovskiy K. A., Tyubeev I. H., Sitnikov D. A. Test bench and studies of rock fracture mechanism in cutting potassium blocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(10):78-91. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_10_0_78.

Введение

На территории РФ и стран ближнего зарубежья разработка подземных месторождений полезных ископаемых осуществляется с использованием горных комбайнов, которые обеспечивают механизацию технологических процессов отбойки и погрузки горной массы, а также установки крепи. На большинстве проходческих и очистных комбайнов, серийно выпускаемых предприятиями горного машиностроения, установлены породоразрушающие органы с режцовым инструментом.

От того, насколько качественно сконструированы породоразрушающие исполнительные органы комбайнов, зависит энергоэффективность реализации процессов проходки и добычи, пылевая обстановка в забое и производительность комбайна в целом [1, 2].

Первичной информацией для разработки новых исполнительных органов

комбайнов является нагрузка на одиночном резце. Для ее расчета необходимо исследовать и количественно оценить прочностные свойства массива (сопротивляемость резанию), а также изучить неявные особенности процесса разрушения горных пород резанием [3, 4].

Из указанного следует, что задача разработки и создания лабораторных стендов, с помощью которых можно экспериментально исследовать процесс разрушения горных пород резанием, является актуальной.

Методологические основы исследования

В большинстве случаев массив горных пород имеет неоднородную структуру, поэтому процесс разрушения пород резанием стоит рассматривать как случайный, описываемый соответствующими статистическими характеристиками [1, 5].

Согласно основным положениям экспериментально-статистической теории разрушения горных пород резанием, процесс взаимодействия одиночного резца и разрушаемого массива сводится к следующему.

В месте контакта режущей кромки резца с породой возникают значительные напряжения, сконцентрированные в малом объеме. При достижении контактными напряжениями предельных значений в предрезцовом пространстве начинается процесс местного дробления породы на весьма мелкие фракции с образованием ядра уплотнения. В процессе движения резца часть мелкодробленой породы с большой скоростью выдавливается вдоль передней грани, но в целом объем ядра уплотнения увеличивается до момента отделения крупного элементарного скола [2, 6, 7].

Дробление породы в предрезцовом пространстве сопровождается нарастанием силы резания. После осуществления скола, когда от массива отделяется крупный элемент, сила резания резко снижается до нулевого или практически околонулевого значения [1, 8, 9].

Изучение процесса разрушения горных пород резцами добычных машин

является сложной задачей, требующей комплексных исследований. Развитие этого процесса во времени зависит от различных случайных факторов, некоторые из которых невозможно учесть аналитически [6, 10]. Поэтому рациональным подходом является использование экспериментального метода исследований, который доказал свою эффективность и был успешно применен при разработке методик расчета параметров породоразрушающих исполнительных органов горных машин.

Стенд для исследования процесса разрушения горных пород одиночным резцом

Сотрудниками кафедры «Горная электромеханика» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» спроектирован лабораторный режуще-испытательный стенд, являющийся физической моделью механизма разрушения породного массива одиночным резцом горного комбайна. Стенд позволяет определить силовые параметры и энергетические показатели процесса разрушения блоков горных пород одиночным резцом, выполнить исследования гранулометрического со-

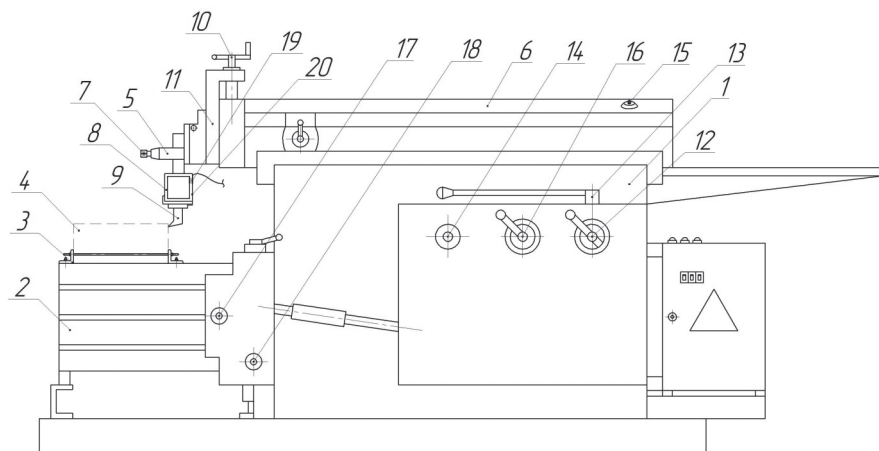


Рис. 1. Принципиальная схема лабораторного стенда

Fig. 1. Schematic diagram of the laboratory bench

става продуктов разрушения, отделяемых от блоков резами с заданными параметрами и схемой расположения, посредством различных типов резов.

Основной лабораторного станда (см. рис. 1) является поперечно-строгальный станок 7307ТД. К станине 1 при помощи передаточных механизмов присоединен стол 2, на котором посредством захватов 3 устанавливается испытываемый блок калийной руды 4. Возвратно-поступательное движение резцедержателя 5 обеспечивается перемещением ползуна 6. В резцедержателе 5 посредством крепежного винта 7 устанавливается измерительная головка 8 с закрепленным на ней одиночным резцом 9. Перемещение резцедержателя 5 в вертикальной плоскости осуществляется при вращении штурвала 10 суппорта 11.

Органами управления станда являются:

- рукоятка 12 установки количества двойных ходов ползуна 6;
- тормоз 13 ползуна 6;
- рукоятка 14 установки величины хода ползуна 6;
- рукоятка 15 установки начального положения ползуна 6;
- рукоятка 16 установки величины автоматического перемещения стола 2 за один двойной ход ползуна 6;
- рукоятки 17 и 18 перемещения в ручном режиме стола 2 в горизонтальной и вертикальной плоскости соответственно.

Чувствительным элементом измерительной системы лабораторного станда является измерительная головка 8.

Измерительная головка 8 предназначена для преобразования усилия, передаваемого на резец 9 при разрушении блока калийной руды 4, в электрический сигнал. Измерительная головка 8 спроектирована под заданный диапазон нагрузок и работает в зоне ожидаемых значений упругих деформаций стоек 20,

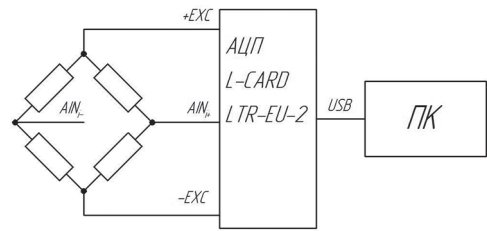


Рис. 2. Схема коммутации измерительного оборудования лабораторного станда

Fig. 2. Switching diagram of the measuring equipment of the laboratory stand

на которые наклеены тензорезисторы 19. Тензорезисторы 19 соединены в мостовую схему (тензоизмерительный мост). На входы моста подается опорное напряжение, на выходы снимается электрический сигнал, пропорциональный деформации стоек измерительной головки (рис. 2).

Измерительная система станда состоит из следующих элементов: измерительная головка с наклеенными тензорезисторами 2ФКП-5-400-А-12С; тензометрический модуль аналого-цифрового преобразователя (АЦП) L-Card LTR-EU-2, LTR 212; персональный компьютер (ПК) с установленным специализированным программным обеспечением L-Graph.

При проведении экспериментов используются следующие типы резов:

- эталонный резец (рис. 3, а);
- резец РС-14 (рис. 3, б);
- резец РС-1-8У (рис. 3, в).

Для установки сменных резов (РС-14 и РС-1-8У) на измерительной головке станда предусмотрены крепления под кулаки-резцедержатели. После каждой смены реза измерительная головка станда повторно калибруется.

Схема и общий вид измерительной головки станда с закрепленным резцом приведены на рис. 4.

Измерительная головка лабораторного станда представляет собой пространственную конструкцию, состоящую из столика 1, выполненного посредством

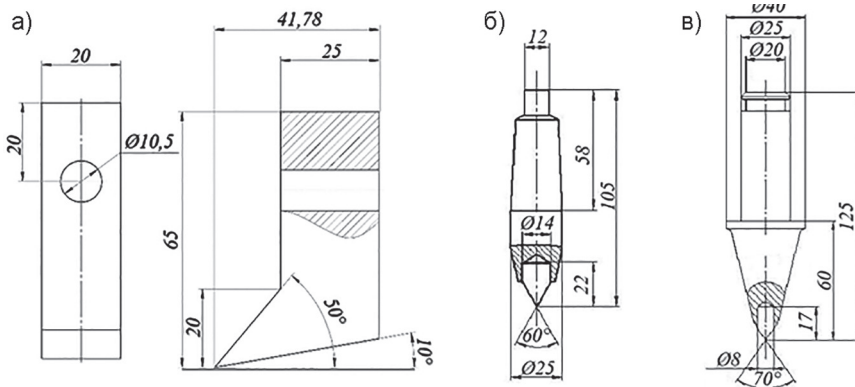


Рис. 3. Резцы, используемые при проведении исследований: эталонный резец (а); РС-14 (б); ПС-1-8У (в)
 Fig. 3. Cutters used in the research: reference cutter (a); RS-14 (b); PS-1-8U (v)

механической обработки из цельного металлического блока стали У10. К нижней части столика 1 через переходной упор 2 крепится кулак 3 с резцом 4. Державка 5 обеспечивает установку и крепление измерительной головки в резцедержателе лабораторного стенда (не показан на рис. 4). Тензодатчики 6 наклеены на стойки 7 столика 1 в зонах концентрации напряжений. Выводы тензодатчиков 6 соединяются с разъемом

АЦП посредством экранированного кабеля.

Перед началом проведения исследований для достижения высокой точности измерений производится калибровка измерительной головки непосредственно на лабораторном стенде. Калибровка производится с использованием динамометров ДС-02 и ДС-3, прошедших государственную метрологическую поверку.

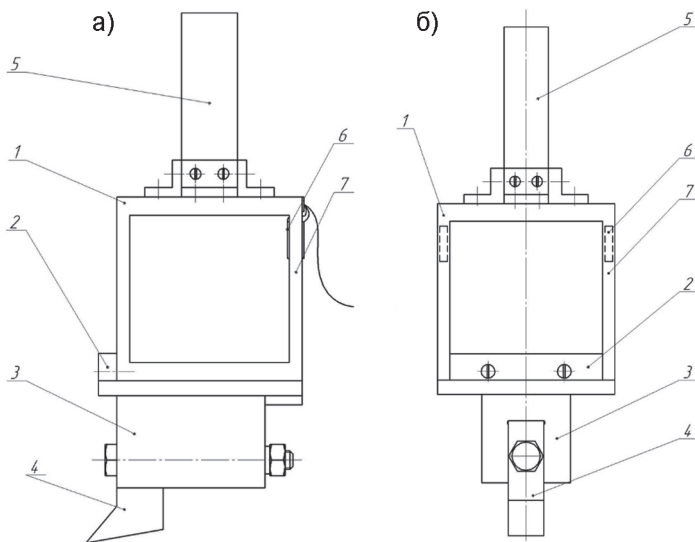


Рис. 4. Измерительная головка лабораторного стенда с установленным эталонным резцом: вид сбоку (а); вид спереди (б)

Fig. 4. Measuring head of the laboratory stand with mounted reference cutter: side view (a); front view (b)

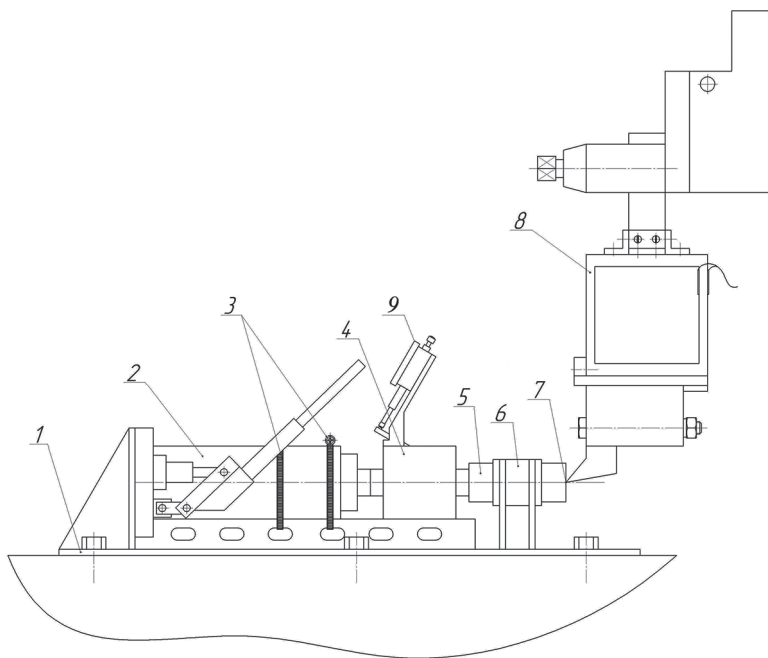


Рис. 5. Схема оснастки для калибровки измерительной головки станда
 Fig. 5. Schematic of tooling for calibration of the measuring head of the stand

При выполнении калибровки для создания нагрузки на резце сонаправленно действию силы резания P_z используется специально изготовленная оснастка с закрепленным поршневым гидравлическим домкратом. Схема оснастки и ее расположение на рабочем столе станда приведена на рис. 5.

Оснастка для калибровки измерительной головки состоит из основания 1, на котором жестко закреплен гидравлический домкрат 2 хомутами 3. Динамометр 4 устанавливается на основании 1 свободно, между штоком домкрата 2 и подвижным пальцем 5, перемещающимся в направляющей 6, выполненной в

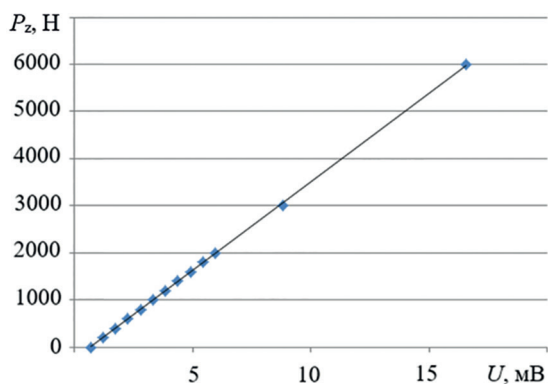


Рис. 6. Калибровочная характеристика измерительной головки лабораторного станда
 Fig. 6. Calibration characteristic of the measuring head of the laboratory stand

виде трубки. Подвижный палец 5 упирается в режущую кромку резца 7, закрепленного на измерительной головке 8. На динамометре 4 имеется индикатор 9, позволяющий определить усилие, передаваемое гидравлическим домкратом 2 через подвижный палец 5 на кромку резца 7.

Результатом калибровки измерительной головки является получение ее калибровочной характеристики, которая представляет собой график $P_z(U)$ зависимости изменения силы резания от величины сигнала тензодатчиков измерительной головки (рис. 6).

Исследование процесса разрушения блоков калийной руды резанием

Исследования процесса разрушения калийной руды одиночным резцом выполнялись на блоках руды, отобранных из продуктивного пласта на одном из месторождений РФ. В процессе выполнения исследований были установлены зависимости изменения удельных затрат энергии H_w в зависимости от тол-

щины стружки h и изменения массовой доли классов руды крупностью «-0,25» в продуктах разрушения $M_{-0,25}$ в зависимости от толщины стружки h при разрушении блоков калийной руды с использованием разных схем резания и типов одиночных резцов.

На первом этапе исследований были определены мгновенные P_{zi} и средние значения $P_{z,cp}$ сил резания при разрушении блоков калийной руды резами с выровненной поверхности эталонным резцом (см. рис. 3, а). Средняя сила резания рассчитывается по формуле

$$P_{z,cp} = \sum_{n=1}^i P_{z,i} / n,$$

где $P_{z,cp}$ – средняя сила резания, Н; $P_{z,i}$ – мгновенное значение силы резания, Н; n – количество замеров мгновенного значения силы резания на временном интервале t , шт.

Пример графика изменения мгновенного значения силы резания во времени $P_{zi}(t)$ при разрушении блока калийной руды эталонным резцом представлен на рис. 7 [4, 11 – 13].

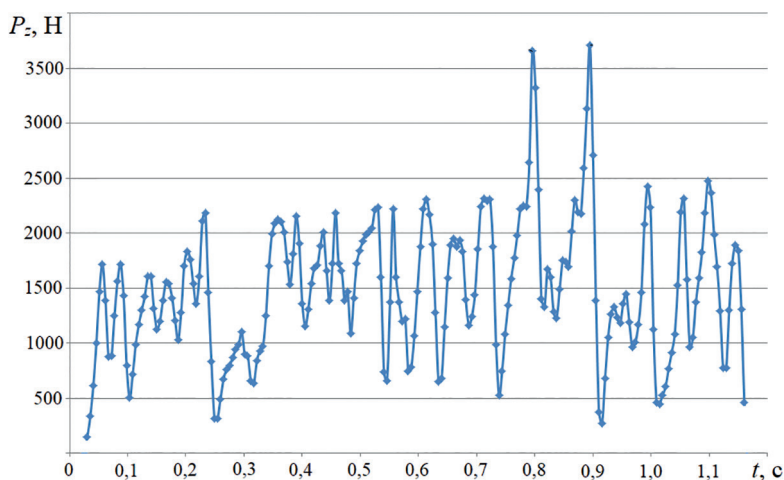


Рис. 7. Изменение мгновенных значений силы резания от времени $P_{zi}(t)$ в процессе разрушения блоков калийной руды резами с выровненной поверхности эталонным резцом при толщине стружки $h = 7$ мм
Fig. 7. Variation of instantaneous values of cutting force from time $P_{zi}(t)$ in the process of destruction of potash ore blocks by cuts from the leveled surface with a reference cutter at chip thickness $h = 7$ mm

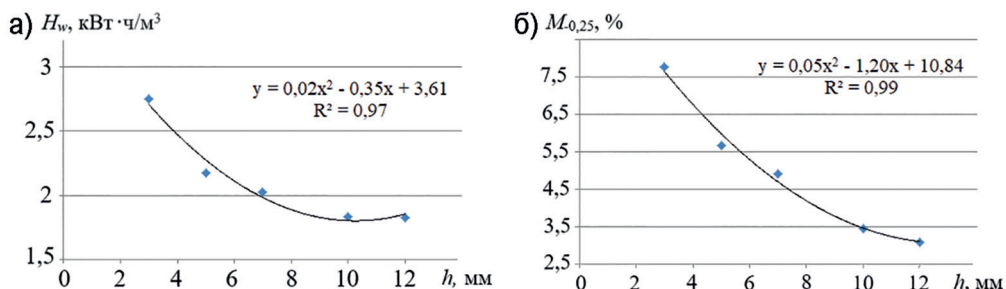


Рис. 8. Изменение удельных затрат энергии (а) и количества труднообогатимых классов «-0,25 мм» в продуктах отбойки (б) при разрушении блоков калийной руды эталонным резцом с выровненной поверхности

Fig. 8. Variation of specific energy consumption (a) and the amount of hard to enrich grades «-0.25 mm» in the stripping products (b) when breaking potash ore blocks with the reference cutter from the leveled surface

При разрушении блоков калийной руды эталонным резцом резами с выровненной поверхности по известной зависимости была определена сопротивляемость резанию испытываемых блоков руды [2, 14]:

$$A_p = P_{z.cp} / h,$$

где A_p — сопротивляемость резанию руды, Н/мм; h — толщина стружки, мм.

Среднее значение сопротивляемости резанию калийной руды по результатам эксперимента составила $A_p = 217,45$ Н/мм.

По результатам определения средних сил резания и масс продуктов разрушения при выполнении резов с выровненной поверхности блоков калийной руды эталонным резцом определена зависимость изменения удельных энергозатрат процесса резания H_w от толщины стружки h (рис. 8, а).

Удельные затраты энергии процесса разрушения блоков калийной руды одиночным резцом определяются по формуле

$$H_w = 27 \cdot 10^{-5} \rho P_{z.cp} L / m,$$

где H_w — удельные затраты энергии на разрушение калийной руды одиночным резцом, кВт·ч/м³; ρ — плотность калийной руды в массиве, т/м³; L — длина реза, мм; m — масса продуктов разрушения, г.

Рассев руды, отделенной от блоков при выполнении резов с выровненной поверхности с использованием эталонного резца, позволил определить зависимость изменения количества классов «-0,25 мм» в продуктах разрушения от толщины стружки $M_{-0,25}(h)$ (рис. 8, б). Массовая доля руды класса «-0,25 мм» в процентах рассчитывается по формуле

$$M_{-0,25} = 100m_{-0,25} / m,$$

где $M_{-0,25}$ — массовая доля руды класса «-0,25 мм» в продуктах разрушения, %; $m_{-0,25}$ — масса руды класса «-0,25 мм» в продуктах разрушения, г.

Анализ полученных зависимостей показывает, что удельные затраты энергии и количество мелких классов в продуктах отбойки при разрушении блоков калийной руды эталонным резцом уменьшаются при увеличении толщины стружки h в заданных диапазонах. Указанное согласуется с положениями экспериментально-статистической теории резания горных пород.

На втором этапе исследований проводилось разрушение блоков калийной руды неповоротным резцом РС-14 (см. рис. 3, б) при использовании шахматной и последовательной схем резания.

Следует отметить, что неповоротные тангенциальные резцы РС-14 имеют пря-

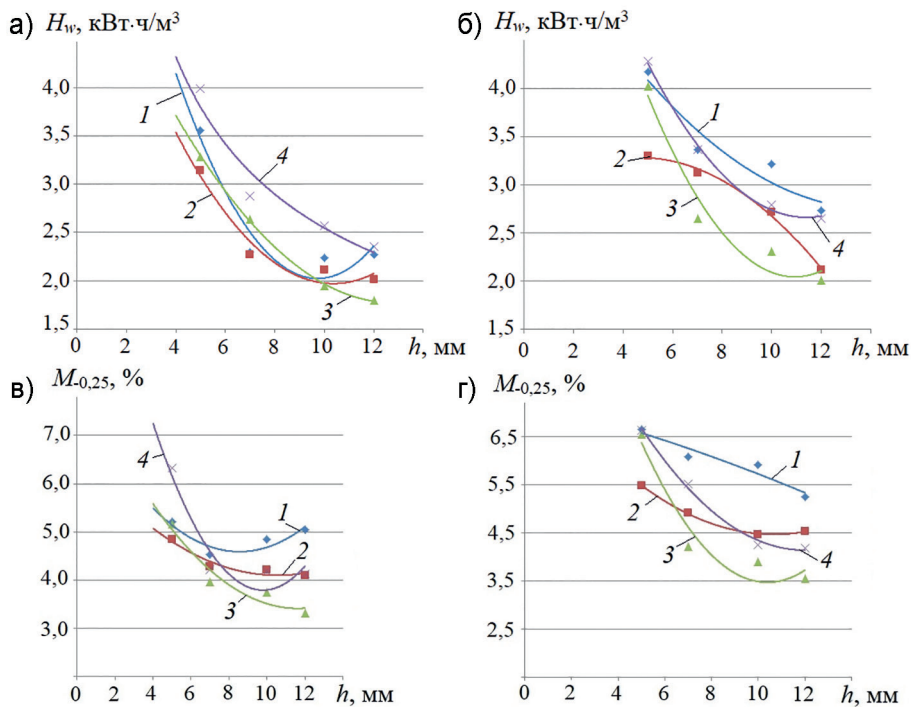
моугольную режущую кромку и плоскую переднюю грань. Использование данных резцов рационально при малых толщинах стружки h : от рудного блока отделяются элементарные сколы, относительно равномерные по крупности, нагрузки на резце характеризуются малыми величинами динамических составляющих [1, 15, 16].

Наличие плоской передней грани и режущей кромки прямоугольной формы у резца РС-14 обуславливает создание в поверхностном слое разрушаемого соляного массива локализованных областей наведенных трещин [5, 17].

Результаты стендовых исследований процесса разрушения блоков калийной

руды одиночным резцом РС-14 с использованием шахматной и последовательной схем резания позволили определить зависимости изменения удельных энергозатрат от толщины стружки $H_w(h)$ при различных значениях шага резания t (рис. 9, а, б). Также установлены зависимости изменения массовой доли классов руды крупностью «-0,25 мм» в продуктах разрушения $M_{-0,25}$ от толщины стружки h при разрушении блоков калийной руды резцом РС-14 шахматными и последовательными резами при различных значениях шага резания t (рис. 9, в, г).

Анализ полученных зависимостей показывает, что при заданной толщине



1 – шаг резания $t = 20$ мм; 2 – шаг резания $t = 30$ мм; 3 – шаг резания $t = 40$ мм; 4 – шаг резания $t = 60$ мм

Рис. 9. Изменение удельных затрат энергии H_w и труднообогатимых классов «-0,25 мм» в продуктах отбойки $M_{-0,25}$ в зависимости от толщины стружки h при разрушении блоков калийной руды резцом РС-14: шахматная схема резания (а, в); последовательная схема резания (б, г)

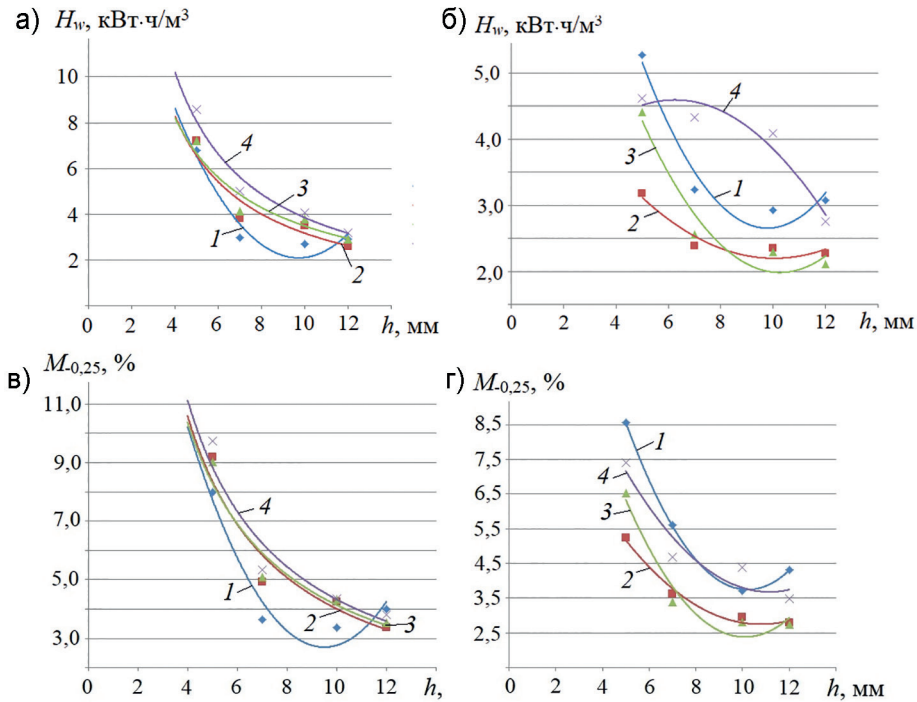
Fig. 9. Variation of specific energy consumption H_w and hard to enrich grades «-0,25 mm» in the products of $M_{-0,25}$ chipping depending on the chip thickness h when destroying potash ore blocks with PC-14 cutter: staggered cutting scheme (a, v); sequential cutting scheme (b, g)

стружки h минимум удельных затрат энергии обеспечивается при разрушении блоков калийной руды при отношении шага резания к толщине стружки $t/h = 2 \dots 4$. При разрушении блоков руды одиночным неповоротным резцом РС-14 последовательными резами с толщиной стружки $h = 5 \dots 12$ мм и шагом резания $t = 20 \dots 60$ мм массовая доля классов руды крупностью « $-0,25$ мм» в продуктах разрушения $M_{-0,25}$ несколько увеличивается по сравнению с шахматной схемой резания [14, 18].

На заключительном этапе исследований производилось разрушение блоков калийной руды резцом ПС-1-8У (см. рис. 3, в) при использовании шахмат-

ной и последовательной схем резания. Поворотные резцы ПС-1-8У имеют коническую форму головной части и предназначены для разрушения горных пород крупными сколами. При толщинах стружки $h = 5 \dots 10$ мм данные резцы дробят породу, отделяя от массивов стружки малых сечений, а значение средней силы резания несущественно зависит от величины шага резания [19, 20].

Результаты стендовых исследований процесса разрушения блоков калийной руды одиночным резцом ПС-1-8У с использованием шахматной и последовательной схем резания позволили определить зависимости изменения удельных энергозатрат процесса разрушения от



1 – шаг резания $t = 20$ мм; 2 – шаг резания $t = 30$ мм; 3 – шаг резания $t = 40$ мм; 4 – шаг резания $t = 60$ мм

Рис. 10. Изменение удельных затрат энергии H_w и труднообогатимых классов « $-0,25$ мм» в продуктах отбойки $M_{-0,25}$ в зависимости от толщины стружки h при разрушении блоков калийной руды резцом ПС-1-8У: шахматная схема резания (а, в); последовательная схема резания (б, г)

Fig. 10. Variation of specific energy consumption H_w and hard to enrich classes « -0.25 mm» in the products of $M_{-0,25}$ chipping depending on the chip thickness h when breaking potash ore blocks with PS-1-8U cutter: staggered cutting scheme (a, v); sequential cutting scheme (b, g)

толщины стружки $H_w(h)$ при различных значениях шага резания t (рис. 10, а, б). Установлены зависимости изменения массовой доли классов руды крупностью «–0,25 мм» в продуктах разрушения $M_{-0,25}$ от толщины стружки h при разрушении блоков калийной руды резцом РС-1-8У шахматными и последовательными резами при различных значениях шага резания t (рис. 10, в, г) [4, 21].

Как и в случае с использованием резца РС-14, характер изменения зависимостей $H_w(h)$ позволяет говорить о том, что при разрушении блоков калийной руды поворотным резцом РС-1-8У с заданной толщиной стружки h минимум удельных затрат энергии H_w обеспечивается при отношении шага резания к толщине стружки $t/h = 2...4$ [1, 5, 22]. При разрушении блоков руды резами РС-1-8У последовательными и шахматными резами с толщиной стружки $h = 8...12$ мм и шагом резания $t = 20...60$ мм массовая доля классов руды крупностью «–0,25 мм» в продуктах разрушения $M_{-0,25}$ несколько меньше по сравнению с резцом РС-14.

Заключение

Решение задач экспериментального определения количественных значений параметров и показателей, характеризующих

процесс разрушения горных пород резанием, представляет научный и практический интерес для горной отрасли страны.

В результате исследований процесса резания блоков калийной руды одиночным резцом были получены следующие данные:

- определено среднее значение сопротивляемости резанию калийной руды $A_p = 217,45$ Н/мм;
- показано, что рациональное отношение шага резания к толщине стружки составляет $t/h = 2...4$, при этом наблюдается минимум удельных затрат энергии H_w на разрушение блоков калийной руды одиночными резами РС-14 и РС-1-8У с заданной толщиной стружки;
- определены зависимости изменения удельных затрат энергии H_w на разрушение блоков калийной руды одиночным резцом и количества труднообогатимых классов в продуктах отбойки при заданных схемах и параметрах резания, а также типах используемого резцового инструмента.

Полученные данные представляют собой первичную информацию для разработки перспективных конструкций исполнительных органов и резцов проходческо-очистных комбайнов нового технического уровня.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шишлянников Д. И. Совершенствование оборудования и режимов работы проходческо-очистных комбайнов калийных рудников как энергоэффективных объектов функционирования. Автореф. дис. ... докт. техн. наук. — СПб., 2021. — 273 с.
2. Казаченко Г. В., Басалай Г. А., Гридюшко Д. В. О разрушении горных пород механическим резанием // Горная механика и машиностроение. — 2022. — № 1. — С. 86–91.
3. Трушкин О. Б., Акчурин Х. И. Давление резцов рдс на пластично-хрупкую горную породу в процессе ее разрушения // Записки Горного института. — 2020. — Т. 244. — С. 448–453. DOI: 10.31897/PMI.2020.4.7.
4. Максимов А. Б. Повышение количества обогатимых классов в калийной руде, добываемой проходческо-очистными комбайнами «Урал-20Р» // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования. — 2018. — Т. 1. — С. 116–122.
5. Максимов А. Б. Обоснование параметров породоразрушающих исполнительных органов и погрузочного оборудования проходческо-очистных комбайнов «Урал 20Р». Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Екатеринбург, 2019. — 18 с.

6. Жабин А. Б., Аверин Е. А., Поляков А. В. Показатель эквивалентной прочности горных пород // Горная промышленность. – 2018. – № 5. – С. 112–115. DOI: 10.30686/1609-9192-2018-5-141-112-115.

7. Shishlyannikov D. I., Suhanov A. E. Improvement of rock-breaking tools of heading-and-winning machine of potash mines // E3S Web of Conferences. 2020, vol. 177, article 03018. DOI: 10.1051/e3sconf/202017703018.

8. Прушак В. Я., Высоцкая Н. А., Казаченко Г. В. Методика расчета мощностного баланса проходческого комбайна с соосными роторами и комбинированными исполнительными органами // Актуальные вопросы машиноведения. – 2017. – № 7. – С. 273–276.

9. Averin E. A., Zhabin A. B., Polyakov A. V., Linnik Y. N., Linnik V. Y. Preliminary assessment of roadheaders efficiency based on empirical methods and index of equivalent rock strength // Mining of Mineral Deposits. 2019, vol. 13, no. 3, pp. 113–118. DOI: 10.33271/mining13.03.113.

10. Попова М. С., Харитонов А. Ю. Автоматизация процесса исследования механизма разрушения горной породы резцом // Справочник. Инженерный журнал. – 2023. – № 8 (317). – С. 23–27. DOI: 10.14489/hb.2023.08.pp.023-027.

11. Андреева Л. И., Красникова Т. И., Ушаков Ю. Ю. Методология формирования эффективной системы обеспечения работоспособности горной техники // Известия вузов. Горный журнал. – 2019. – № 5. – С. 92–106. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-5-92-106.

12. Нескоромных В. В., Пушмин П. С., Попова М. С. Влияние поверхностно-активных веществ на искривление скважин при бурении в анизотропных горных породах // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 9. – С. 146–158. DOI: 10.18799/24131830/2020/9/2819.

13. Жабин А. Б., Поляков А. В., Аверин А. Е., Линник Ю. Н., Линник В. Ю. Об учете неоптимальных режимов резания горных пород тангенциальными резцами // Уголь. – 2019. – № 7. – С. 20–24. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-7-20-24.

14. Арсентьев Ю. А., Соловьев Н. В., Назаров А. П. Обоснование основных параметров механизма разрушения горных пород и конструктивных элементов лопастных долот // Инженер-нефтяник. – 2019. – № 2. – С. 13–20.

15. Евстратов В. А., Воронова Э. Ю., Апачанов А. С., Григорьев В. И., Сухарникова В. А., Бреславцева И. В. Повышение эффективности шнековых модулей горных машин // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – № 2 (154). – С. 42–47. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-2-42-47.

16. Шишлянников Д. И., Трифанов М. Г., Трифанов Г. Д. Оценка нагруженности приводов комбайнов «Урал-20Р» при двухстадийной разработке забоя // Записки Горного института. – 2020. – Т. 242. – С. 508–512. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.508.


17. Давиденко А. М., Хоменко В. Л. Планетарные породоразрушающие конструкции и возможности их применения в алмазном бурении // Научный вестник Национального горного университета. – 2020. – № 4. – С. 75–78.

18. Tuncay E., Özcan N. T., Kalender A. An approach to predict the length-to-diameter ratio of a rock core specimen for uniaxial compression tests // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2019, vol. 78, no. 7, pp. 5467–5482. DOI: 10.1007/s10064-019-01482-6.

19. Gao M., Zhang K., Zhou Q., Zhou H., Liu B., Zheng G. Numerical investigations on the effect of ultra-high cutting speed on the cutting heat and rock-breaking performance of a single cutter // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2020, vol. 190, article 107120. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107120.

20. Li H. S., Liu S. Y., Xu P. P. Numerical simulation on interaction stress analysis of rock with conical picks // Tunnelling and Underground Space Technology. 2019, vol. 85, pp. 231–242. DOI: 10.1016/j.tust.2018.12.014.

21. 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.

22. Chang C., Yang Y., Ren H., Cai C., Liu Y., Yang M. Investigation of the cross-cutting polycrystalline diamond compact bit drilling efficiency // Shock and Vibration. 2021, vol. 30, pp. 15–27. DOI: 10.1155/2021/8841255. 

REFERENCES

1. Shishlyannikov D. I. *Sovershenstvovanie oborudovaniya i rezhimov raboty prokhodchesko-ochistnykh kombaynov kaliynnykh rudnikov kak energoeffektivnykh ob"ektov funktsionirovaniya* [Improvement of equipment and operating modes of tunneling and cleaning combines of potash mines as energy-efficient objects of operation], Doctor's thesis, Saint-Petersburg, 2021, 273 p.
2. Kazachenko G. V., Basalai G. A., Gridyushko D. V. On the destruction of rocks by mechanical cutting. *Gornaya mekhanika i mashinostroenie*. 2022, no. 1, pp. 86 – 91. [In Russ].
3. Trushkin O. B., Akchurin H. I. The pressure of pdc cutters on plastic-brittle rock in the process of its destruction. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 244, pp. 448 – 453. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.4.7.
4. Maksimov A. B. Increasing the number of enrichable classes in potash ore produced by Ural-20R tunneling and cleaning combines. *Aktual'nye problemy povysheniya effektivnosti i bezopasnosti ekspluatatsii gornoshakhtnogo i neftepromyslovogo oborudovaniya*. 2018, vol. 1, pp. 116 – 122. [In Russ].
5. Maksimov A. B. *Obosnovanie parametrov porodorazrushayushchikh ispolnitel'nykh organov i pogruzochnogo oborudovaniya prokhodchesko-ochistnykh kombaynov «Ural 20R»* [Substantiation of parameters of rock–destroying executive bodies and loading equipment of Ural 20R tunneling and cleaning combines], Candidate's thesis, Ekaterinburg, 2019, 18 p.
6. Zhabin A. B., Averin E. A., Polyakov A. V. The index of equivalent strength of rocks. *Russian Mining Industry Journal*. 2018, no. 5, pp. 112 – 115. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2018-5-141-112-115.
7. Shishlyannikov D. I., Suhanov A. E. Improvement of rock-breaking tools of heading-and-winning machine of potash mines. *E3S Web of Conferences*. 2020, vol. 177, article 03018. DOI: 10.1051/e3sconf/202017703018.
8. Prushak V. Ya., Vysotskaya N. A., Kazachenko G. V. Method of calculating the power balance of a tunneling combine with coaxial rotors and combined executive bodies. *Aktual'nye voprosy mashinovedeniya*. 2017, no. 7, pp. 273 – 276. [In Russ].
9. Averin E. A., Zhabin A. B., Polyakov A. V., Linnik Y. N., Linnik V. Y. Preliminary assessment of roadheaders efficiency based on empirical methods and index of equivalent rock strength. *Mining of Mineral Deposits*. 2019, vol. 13, no. 3, pp. 113 – 118. DOI: 10.33271/mining13.03.113.
10. Popova M. S., Kharitonov A. Yu. Automation of the process of studying the mechanism of destruction of rock by a cutter. *Handbook. An Engineering Journal*. 2023, no. 8 (317), pp. 23 – 27. [In Russ]. DOI: 10.14489/hb.2023.08.pp.023-027.
11. Andreeva L. I., Krasnikova T. I., Ushakov Yu. Yu. Methodology for the formation of an effective system for ensuring the operability of mining equipment. *Minerals and Mining Engineering*. 2019, no. 5, pp. 92 – 106. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-5-92-106.
12. Neskoromnykh V. V., Pushmin P. S., Popova M. S. The influence of surfactants on the curvature of wells during drilling in anisotropic rocks. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020, vol. 331, no. 9, pp. 146 – 158. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2020/9/2819.
13. Zhabin A. B., Polyakov A. V., Averin A. E., Linnik Yu. N., Linnik V. Yu. On accounting for non-optimal modes of cutting rocks with tangential cutters. *Ugol'*. 2019, no. 7, pp. 20 – 24. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-7-20-24.
14. Arsentiev Yu. A., Solovyov N. V., Nazarov A. P. Substantiation of the main parameters of the mechanism of destruction of rocks and structural elements of blade bits. *Inzhener-neftyanik*. 2019, no. 2, pp. 13 – 20. [In Russ].
15. Evstratov V. A., Voronova E. Yu., Apachanov A. S., Grigoriev V. I., Sukharnikova V. A., Brel'slavtseva I. V. Improving the efficiency of screw modules of mining machines. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2021, no. 2 (154), pp. 42 – 47. [In Russ]. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-2-42-47.
16. Shishlyannikov D. I., Trifanov M. G., Trifanov G. D. Evaluation of the loading of drives of combines «Ural-20R» during two-stage development of the face. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 242, pp. 508 – 512. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.508.
17. Davydenko A. M., Khomenko V. L. Planetary rock-breaking structures and the possibilities of their application in diamond drilling. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2020, no. 4, pp. 75 – 78.
18. Tuncay E., Özcan N. T., Kalender A. An approach to predict the length-to-diameter ratio of a rock core specimen for uniaxial compression tests. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2019, vol. 78, no. 7, pp. 5467 – 5482. DOI: 10.1007/s10064-019-01482-6.

19. Gao M., Zhang K., Zhou Q., Zhou H., Liu B., Zheng G. Numerical investigations on the effect of ultra-high cutting speed on the cutting heat and rock-breaking performance of a single cutter. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020, vol. 190, article 107120. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107120.

20. Li H. S., Liu S. Y., Xu P. P. Numerical simulation on interaction stress analysis of rock with conical picks. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019, vol. 85, pp. 231 – 242. DOI: 10.1016/j.tust.2018.12.014.

21. Gabov V. V., Nguyen K. L., Nguyen V. S., Le T. B., Zadkov D. A. Substantiation of geometric and operating parameters of screw executive bodies ensuring the efficiency of loading coal onto a down-hole conveyor. *Ugol'*. 2018, no. 2, pp. 32 – 35. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-2-32-35.

22. Chang C., Yang Y., Ren H., Cai C., Liu Y., Yang M. Investigation of the cross-cutting polycrystalline diamond compact bit drilling efficiency. *Shock and Vibration*. 2021, vol. 30, pp. 15 – 27. DOI: 10.1155/2021/8841255.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шишлянников Дмитрий Игоревич¹ – д-р техн. наук,

доцент, профессор, e-mail: dish844@gmail.com,

Грибов Дмитрий Сергеевич² – начальник горного отдела,

e-mail: dmitriy.gribov@mail.ru,

Просовский Константин Александрович² – ведущий инженер,

e-mail: prosovskij86@mail.ru,

Тюбеев Ибрагим Хизирович¹ – учебный мастер,

e-mail: tyubeev2001@mail.ru,

Ситников Дмитрий Александрович¹ – лаборант,

e-mail: stdm2023@mail.ru,

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

² АО «ВНИИ Галургии».

Для контактов: Грибов Д.С., e-mail: dmitriy.gribov@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

D.I. Shishlyannikov¹, Dr. Sci. (Eng.),

Assistant Professor, Professor,

e-mail: dish844@gmail.com,

D.S. Gribov², Head of the Mining Department,

e-mail: dmitriy.gribov@mail.ru,

K.A. Prosovskiy², Leading Engineer,

e-mail: prosovskij86@mail.ru,

I.H. Tyubeev¹, Educational Master,

e-mail: tyubeev2001@mail.ru,

D.A. Sitnikov¹, Laboratory Assistant,

e-mail: stdm2023@mail.ru,

¹ Perm National Research Polytechnic University,

614990, Perm, Russia,

² JSC «VNII Galurgy», 198216, Saint-Petersburg, Russia,

Corresponding author: D.S. Gribov, e-mail: dmitriy.gribov@mail.ru.

Получена редакцией 09.04.2024; получена после рецензии 31.05.2024; принята к печати 10.09.2024.

Received by the editors 09.04.2024; received after the review 31.05.2024; accepted for printing 10.09.2024.

