ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025;(11):99-111
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.232.72 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_99

# ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ РЕЗЦОВОГО ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА КОМБАЙНОВЫХ КОМПЛЕКСОВ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ

**Д.С. Грибов[1], Д.А. Ситников[2], Д.И. Шишлянников[2]**

[1] АО «ВНИИ Галургии», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: dmitriy.gribov@mail.ru
[2] Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

***Аннотация:*** Для калийной промышленности актуальной является задача повышения эффективности процесса разрушения массивов калийно-магниевых солей посредством снижения удельных затрат энергии на отделение руды от забоя и уменьшения доли необогатимых классов руды в добываемой горной массе. Перспективным направлением исследований является совершенствование конструкции породоразрушающего инструмента, а именно – обоснование рациональных геометрических параметров головных частей резцов. С теоретической точки зрения, разрушение калийных руд резанием является случайным, многофакторным процессом, описываемым соответствующими статистическими характеристиками, количественная оценка которых возможна посредством использования экспериментального метода исследований, например, на лабораторных стендах. Авторами разработан стенд и описана методика для определения силовых параметров и энергетических показателей процесса разрушения горных пород одиночным резцом. Для снижения нагрузок на лабораторный стенд обосновано использование и выбран модельный материал, аналогичный по характеру разрушения калийной руде, представляющий собой строительные плиты из гипса. Приведены результаты стендовых испытаний процесса разрушения модельного материала одиночным резцом, которые позволили определить зависимости изменения средних сил резания на одиночном резце и удельных затрат энергии на разрушение от толщины стружки и шага резания при использовании последовательной и шахматной схем резания. Выявлены рациональные геометрические параметры резцов, при которых наблюдается снижение сил резания и уменьшение удельных затрат энергии процесса разрушения блоков модельного материала одиночным резцом.

***Ключевые слова:*** резец, лабораторный стенд, калийная руда, модельный материал, схема резания, удельные затраты энергии, сила резания, шаг резания, толщина стружки, сопротивляемость резанию.

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

***Для цитирования:*** *Грибов Д. С., Ситников Д. А., Шишлянников Д. И.* Перспективные конструкции резцового породоразрушающего инструмента комбайновых комплексов калийных рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 11. – С. 99–111. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_99.

## Promising designs of cutting picks for shearers in potash mines

**D.S. Gribov[1], D.A. Sitnikov[2], D.I. Shishlyannikov[2]**

[1] JSC «VNII Galurgii», Saint-Petersburg, Russia, e-mail: dmitriy.gribov@mail.ru
[2] Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

***Abstract:*** The potash industry sees its top priority as enhancement of efficiency of potassium–magnesium salt mining by means of reduction in energy cost of salt rock cutting and in percentage of waste rock in produced ore. A promising pathway of research is improvement of a rock cutting tool design, namely, substantiation of rational geometric parameters for head portions of cutting picks. Theoretically, potash ore cutting is a random multi-factor process describable with statistical characteristics which are quantifiable through experimental research, for instance, laboratory bench-scale testing. The authors have designed a test bench and describe a procedure for determining forces and energy indicators of rock cutting with a single pick. Aimed to reduce loading of the test bench, it is justified to use a model material which is analogous to potash ore in terms of fracture pattern and represents gypsum slabs. The article describes the bench testing results of cutting the model material with a single pick. The test results made it possible to determine the average cutting forces on the single pick and the specific fracture energy as functions of the depth of cut and cutting pitch in the events of successive and checkerboard patterns of cutting. The rational geometric parameters of cutting picks, such that provided an observable decrease in the cutting force and specific energy in cutting the model material blocks with a single picks, were determined.

***Key words:*** cutting pick, laboratory test bench, potash ore, model material, cutting pattern, specific energy, cutting force, cutting pitch, depth of cut, cuttability.

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

***For citation:*** Gribov D. S., Sitnikov D. A., Shishlyannikov D. I. Promising designs of cutting picks for shearers in potash mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(11):99-111. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_99.

### Введение

Современные технологии разработки калийных месторождений характеризуются высокими трудозатратами и расходами, связанными с эксплуатацией оборудования, а также большим количеством отходов горного производства. Проходческо-очистные комбайны, применяемые для разработки продуктивных пластов в калийной промышленности России, оснащены породоразрушающими исполнительными органами режущего типа [1].

Актуальной является задача повышения эффективности процесса разрушения калийных руд резанием посредством снижения удельных энергозатрат на отделение калийной руды от массива и уменьшение доли мелких, труднообогатимых классов руды в добываемой горной массе. Одним из решений указанной задачи является совершенствование конструкции породоразрушающего инструмента, то есть резцов, проходческо-очистных комбайнов.

### Методологические основы исследования

В настоящее время при разработке калийных месторождений на территории

России преимущественно используются проходческо-очистные комбайны типа «Урал» производства АО «Копейский машиностроительный завод», «КПО» производства ЗАО «Солигорский институт проблем ресурсосбережения с опытным производством» и «Универсал» производства ОАО «ЛМЗ Универсал» (УПП «НИВА», г. Солигорск). Данные комбайны оснащаются планетарно-дисковыми исполнительными органами бурового типа с установленными на них резцами: неповоротными РС-14 (РС-14У) и поворотными ПС1-8У (рис. 1) [2 – 4].

Неповоротные тангенциальные резцы РС-14 (рис. 1, *а*) предназначены для установки на верхнем отбойном устройстве, шнеках и бермовых фрезах комбайна и применяются для разрушения вязких калийных руд при резании стружками малой толщины [5]. Для резцовых дисков планетарных исполнительных органов комбайнов «Урал-20Р» применяются неповоротные резцы РС-14У с увеличенным радиальным вылетом (удлиненные). Простой и надежный способ крепления неповоротных резцов минимизирует вероятность их потери вследствие разбалтывания в посадочном отверстии кулака-резцедержателя.

Резцы ПС1-8У (рис. 1, *б*) — тангенциальные, с конической головной частью, устанавливаются в кулаках-резцедержателях с возможностью поворота относительно собственной оси. Данные резцы применяются для разрушения относительно хрупких калийных руд последовательными крупными сколами. За счет поворота резца износ головной части осуществляется равномерно, что обусловливает самозатачивание резца в процессе работы. Существенным недостатком поворотных резцов является износ установочных отверстий кулаков-резцедержателей и державок вследствие вращения последних [6, 7].

Общим недостатком предложенных конструкций является неоптимальная геометрия режущей части резца, негативно влияющая на силовые параметры и энергетические показатели процесса разрушения калийных руд [8, 9].

Известно, что процесс разрушения горных пород резанием характеризуется как случайный, многофакторный процесс чередования фаз контактного дробления руды и образования крупных последовательных элементарных сколов [10, 11]. Эффективность описываемого процесса оценивается по обобщенным показателям: удельным энергозатратам процесса разрушения руды, количеству пылевидных труднообогатимых классов в добываемой руде. Среднее значение силы резания $P_z$ является основной статистической характеристикой процесса разрушения калийной руды одиночным резцом.

Расчетное значение $P_z$ определяется, согласно отраслевой методике АО «ВНИИ Галургии» [12], по формуле

$$P_z = A_p\, h\, k_{t/h}\, k_b\, k_\alpha\, k_{зат}\, k_ф\, k_\lambda \qquad (1)$$

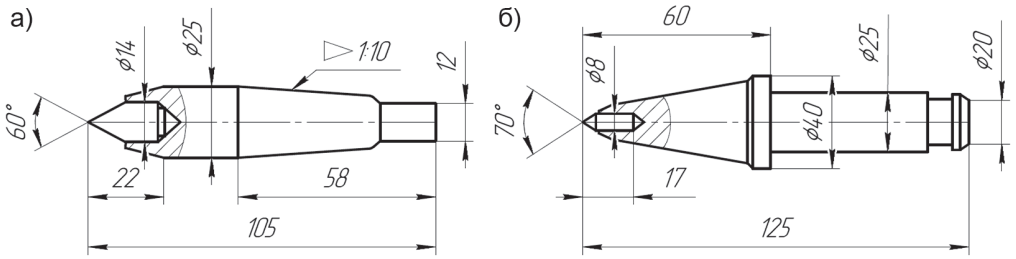



*Рис. 1. Резцы комбайнов для добычи калийной руды: РС-14 (а); ПС1-8У (б)*
*Fig. 1. Cutters of mining combines for mining potash ore: RS-14 (a); PS1-8U (b)*

***Значения коэффициентов формы передней грани резца $k_ф$***
***Values of shape factors of cutting pick face ($S_F$)***

| Форма режущей кромки | Форма передней грани | | |
|---|---|---|---|
| | плоская | полукруглая выпуклая | крышевидная |
| Полукруглая выпуклая | 0,57 … 0,62 | 0,57 | 0,66 … 0,74 |
| Прямоугольная долотчатая | 0,93 … 1,00 | не применяется | не применяется |
| Треугольная | 0,79 … 0,84 | 0,68 … 0,71 | 0,77 … 0,85 |

где $P_z$ — сила резания на одиночном неповоротном резце, Н; $A_p$ — сопротивляемость калийной руды резанию, Н/мм; $h$ — глубина реза, мм; $k_{t/h}$ — коэффициент степени блокированности реза; $k_b$ — коэффициент ширины режущей кромки резца; $k_α$ — коэффициент угла резания; $k_{зат}$ — коэффициент затупления резца; $k_ф$ — коэффициент формы передней грани резца; $k_λ$ — коэффициент ориентации резца.

Анализ формулы (1) показывает, что, среди прочего, на значение $P_z$ существенное влияние оказывают геометрические параметры резца. В частности, разработчиками методики [12, 13] экспериментально определены значения коэффициентов формы передней грани резца (таблица) и их влияние на величину $P_z$.

Анализ данных таблицы показывает, что резец РС-14, имеющий прямоугольную долотчатую режущую кромку и плоскую переднюю грань, характеризуется наибольшим значением коэффициента формы передней грани $k_ф$ = = 0,93 … 1. Наименьшая величина $k_ф$ = = 0,57 обеспечивается при использовании резца с полукруглой выпуклой формой режущей кромки и плоской или полукруглой выпуклой формой передней грани.

Рациональным представляется проведение исследований, направленных на совершенствование конструкции резцов комбайнов для добычи калийных руд.

Экспериментальные исследования по оценке влияния геометрических параметров резцов проходческо-очистных комбайнов на эффективность процесса разрушения калийных руд резанием выполнены на лабораторном стенде, разработанном сотрудниками кафедры «Горная электромеханика» ФГАОУ ВО

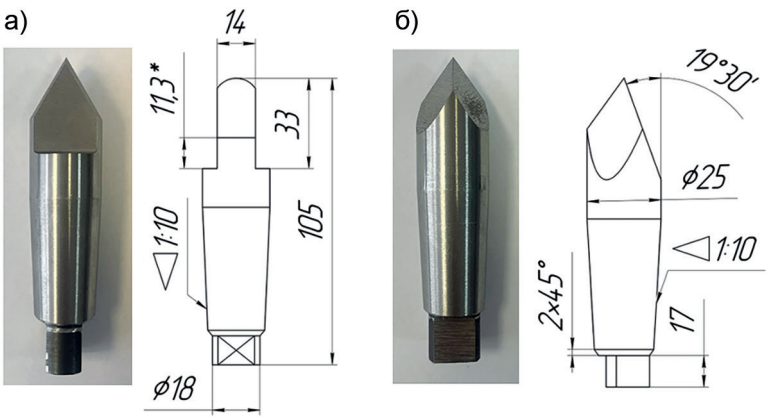



*Рис. 2. Общий вид и схемы резцов РС-55 (а) и РП (б)*
*Fig. 2. General view and diagrams of RS-55 (a) and RP (b)*

«Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ) совместно со специалистами АО «ВНИИ Галургии».

Для проведения исследований авторами разработаны и изготовлены перспективные конструкции тангенциальных неповоротных резцов (см. рис. 2).

Неповоротный резец, получивший рабочее название РС-55 (рис. 2, *а*), имеет полукруглую выпуклую форму режущей кромки и передней грани. Конструкция резца РС-55 определяет наличие двух режущих поверхностей, что позволяет (аналогично с РС-14) переустанавливать резец в кулаке-резцедержателе в случае затупления одной из кромок. Данная конструктивная особенность позволяет повысить срок службы резца и тем самым снизить удельный расход резцового инструмента при работе комбайнов.

Перспективный резец, получивший рабочее название РП (рис. 2, *б*), также является неповоротным и характеризуется наличием головной части в виде треугольной равнобедренной пирамиды.

Данный резец предназначен для разрушения относительно хрупких калийных руд последовательными крупными сколами при больших толщинах стружки *h*. Конструкция резца РП определяет наличие трех режущих поверхностей, что, как и в случае с резцом РС-55, позволяет переустанавливать резец в кулаке-резцедержателе в случае затупления одной из кромок для снижения удельного расхода резцового инструмента.

### Стенд для исследования процесса разрушения горных пород одиночным резцом

При проведении исследований использован лабораторный стенд, моделирующий процесс 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 состава продуктов разрушения, отделяемых от блоков резами с заданными параметрами и схемой расположения, посредством различных типов резцов [14]. Полученные в ходе экспериментов данные могут быть применены при разработке перспективных конструкций исполнительных органов и резцов проходческо-очистных комбайнов.

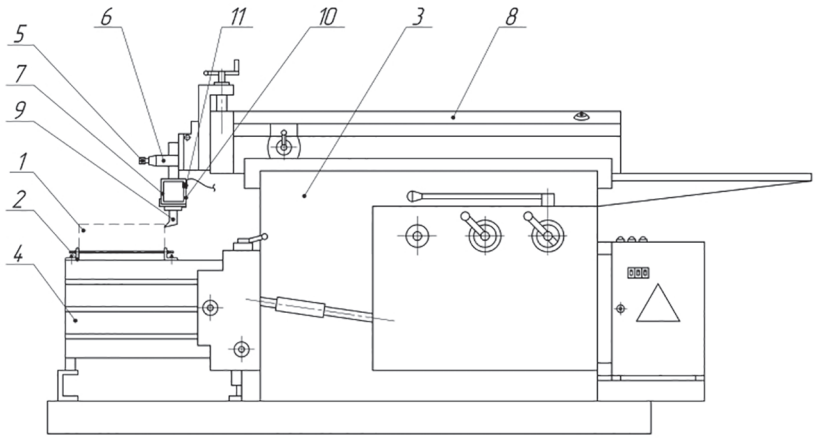



*Рис. 3. Принципиальная схема лабораторного режуще-испытательного стенда*
*Fig. 3. Schematic diagram of a laboratory cutting and testing stand*

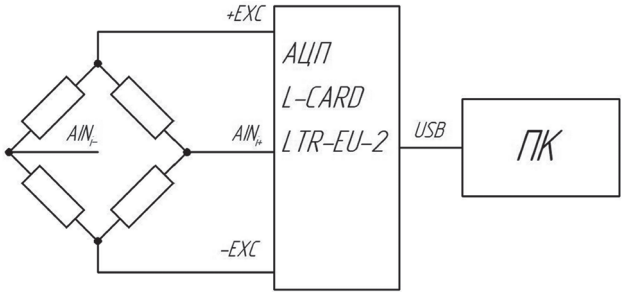



*Рис. 4. Схема коммутации измерительного оборудования лабораторного стенда*
*Fig. 4. Switching scheme of measuring equipment of the laboratory stand*

Основой лабораторного стенда (см. рис. 3) является поперечно-строгальный станок 7307ТД. Блоки калийной руды *1* с помощью захватов *2* устанавливаются на подвижном относительно станины *3* столе *4*. Закрепленная крепежным винтом *5* в резцедержателе *6* измерительная головка *7* посредством перемещения ползуна *8* совершает поступательное движение, приводящее к разрушению блоков калийной руды *1* одиночным резцом *9*. Предназначенная для преобразования усилия на одиночном резце *9* измерительная головка *7* имеет заданный диапазон нагрузок, не превышающих зону упругих деформаций стоек *10*, на которые наклеены тензорезисторы *11*.

Тензорезисторы *11* соединены в мостовую схему (тензоизмерительный мост). На входы моста подается опорное напряжение (5 мВ), на выходе моста снимается электрический сигнал, пропорциональный деформации стоек измерительной головки (рис. 4).

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

В ходе подготовки лабораторной стендовой установки к проведению экспериментальных исследований выполнялась проверка правильности сборки измерительной цепи, а также калибровка измерительной головки.

При реализации стендовых исследований было принято решение заменить блоки калийной руды модельным материалом, что обусловлено прочностными характеристиками стенда и высокой трудоемкостью изготовления блоков калийной руды. При выборе модельного материала авторы руководствовались следующими требованиями:

- меньшие прочность и твердость, по сравнению с калийной рудой, вследствие этого — меньшая сопротивляемость резанию;
- изотропность материала;
- реализация квазихрупкого характера разрушения;
- доступность.

В результате поиска в качестве модельного материала, удовлетворяющего указанным требованиям, были выбраны формованные строительные полнотелые гипсовые плиты.

**Результаты исследования**

Для сравнения сопротивляемости резанию блоков калийной руды и гипса были выполнены установочные резы с выровненной поверхности эталонным резцом. Параметры эталонного резца:

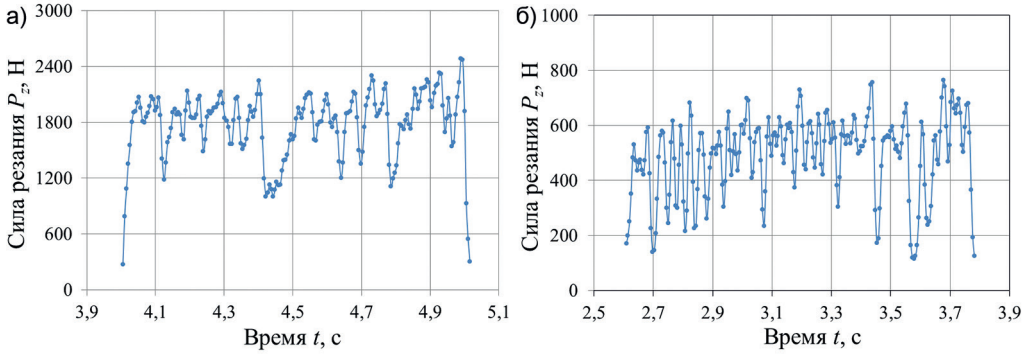



*Рис. 5. Изменение мгновенных значений силы резания от времени $P_{zi}(t)$ в процессе разрушения блоков калийной руды (а) и плит гипса (б) резами с выровненной поверхности эталонным резцом при толщине стружки h = 7 мм*

*Fig. 5. Change in the instantaneous values of the cutting force from time $P_{zi}(t)$ during the destruction of potash ore blocks (a) and gypsum slabs (b) by cuts from a leveled surface with a reference cutter with a chip thickness of h = 7 mm*

режущая кромка прямоугольная, шириной 20 мм, передняя грань — плоская, угол резания 50°, задний угол 10°, угол между боковыми поверхностями 0° [14].

В результате получены графики изменения силы резания от времени при разрушении блоков калийной руды (см. рис. 5, *а*) и модельного материала — гипса (рис. 5, *б*), наглядно отражающие разницу в физико-механических свойствах материалов. При выполнении анализа силовых параметров резания были получены графики приращения средней силы резания от толщины стружки $P_z(h)$ для калийной руды и для гипса (рис. 6).

Аппроксимация полученных графиков, имеющих схожую тенденцию приращения средней силы резания от толщины стружки, позволила получить значения средней сопротивляемости резанию, которые составили для блоков калийной руды 267 Н/мм, для гипса — 53 Н/мм.

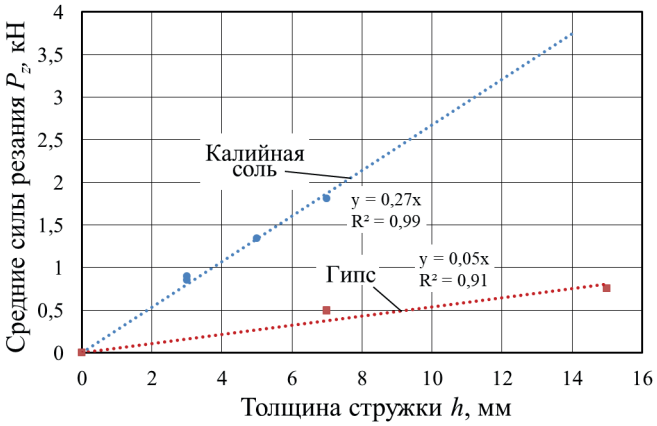



*Рис. 6. Зависимость изменения средней силы резания $P_z$ на эталонном резце от толщины стружки h при разрушении блоков калийной руды и гипса резами с выровненной поверхности*

*Fig. 6. Dependence of the change in the average cutting force $P_z$ on the reference cutter on the chip thickness h during the destruction of blocks of potash ore and gypsum by cuts from a leveled surface*

Таким образом, можно сделать вывод о качественной схожести физико-механических свойств калийной руды и гипса в процессе резания одиночным резцом, что подтверждает возможность использования гипсовых блоков для проведения стендовых исследований.

Далее одиночные резы выполнялись на блоках калийной руды и гипса резцами РС-14, РС-55 и РП с толщиной стружки $h$ = 5 мм. Продукты разрушения собирались и взвешивались.

Удельные энергозатраты процесса разрушения блоков калийной руды и гипса одиночным резцом рассчитывались по формуле

$$H_w = 0{,}27\frac{P_z L \gamma_k}{G \cdot 10^6}, \qquad (2)$$

где $H_w$ — удельные затраты энергии при разрушении блока исследуемого материала, кВт·ч/м$^3$; $L$ — длина реза, м; $G$ — масса продуктов разрушения, кг; $\gamma_k$ — плотность исследуемого материала в разрушаемом образце [15].

Диаграммы сил резания $P_z$ и удельных затрат энергии $H_w$ при разрушении блоков калийной руды и гипса одиночными резами резцами РС-14, РС-55 и РП представлены на рис. 7.

Анализ полученных данных показал, что силовые параметры и энергетические показатели процессов разрушения блоков калийной руды и блоков гипса резцами РС-14, РС-55 и РП качественно схожи, что позволяет использовать гипс как модельный материал для проведения дальнейших исследований.

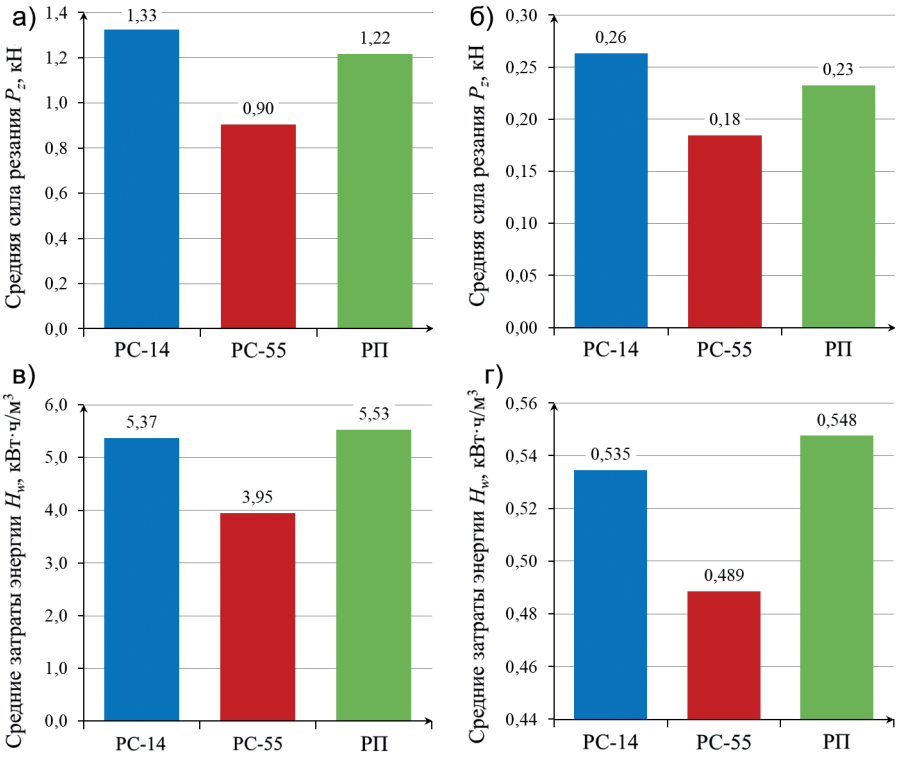
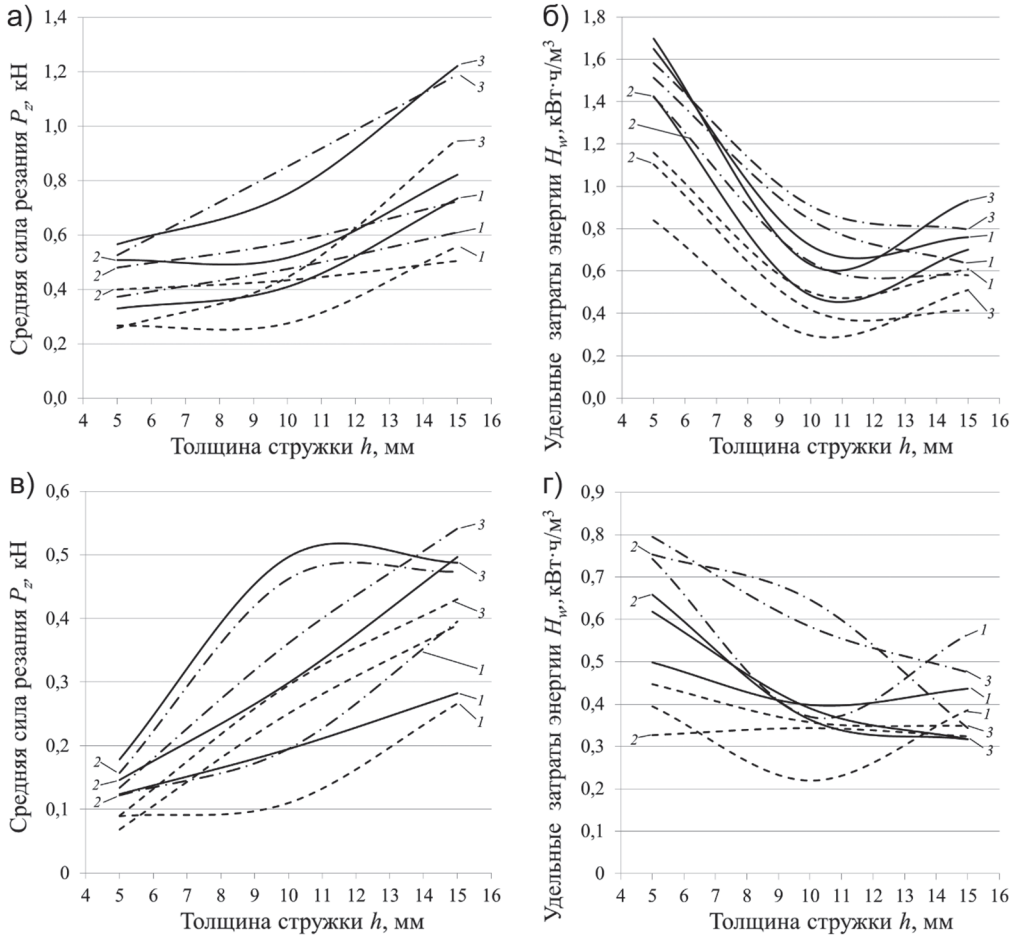



*Рис. 7. Диаграммы средних сил резания $P_z$ и затрат энергии $H_w$ при разрушении: блоков калийной руды (а, в); блоков гипса (б, г)*

*Fig. 7. Diagrams of average cutting forces $P_z$ and energy consumption $H_w$ during the destruction of: potash ore blocks (a, v); gypsum blocks (b, g)*

Полученные величины средних сил резания количественно характеризуют влияние формы режущей кромки и передней грани резца на параметры процесса резания калийной руды, подтверждая значения коэффициентов, приведенных в таблице.

Зависимости изменения средних сил резания $P_z$ и удельных затрат энергии $H_w$ при разрушении блоков гипса одиночными резцами РС-14, РС-55 и РП последовательными и шахматными резами приведены на рис. 8. При последовательной схеме резания резцы раз-




1 – шаг резания $t$ = 20 мм; 2 – $t$ = 40 мм; 3 – $t$ = 60 мм; —— РС-14; - - - РС-55; —·— РП

*Рис. 8. Изменение показателей процесса разрушения гипсовых блоков последовательными (а, б), шахматными (в, г) резами от толщины стружки h: средние силы резания при разрушении блоков гипса последовательными резами (а); изменение удельных затрат энергии при разрушении блоков гипса последовательными резами (б); средние силы резания при разрушении блоков гипса шахматными резами (в); изменение удельных затрат энергии при разрушении блоков гипса шахматными резами (г)*

*Fig. 8. Change in the process of destruction of gypsum blocks by successive (a, b), staggered (v, g) cuts depending on the chip thickness h: average cutting forces during the destruction of gypsum blocks by successive cuts (a); change in specific energy consumption during the destruction of gypsum blocks by successive cuts (b); average cutting forces during destruction of gypsum blocks by staggered cuts (v); change in the specific energy consumption during the destruction of gypsum blocks by staggered cuts (g)*

рушают модельный материал по резам предыдущего слоя. При шахматной схеме резания резцы разрушают модельный материал по целикам между резами предыдущего слоя, заглубляясь относительно резов предыдущего слоя на половину толщины стружки.

**Анализ полученных результатов**

Результаты получены при заданных значениях шага резания $t$ = 20, 40 и 60 мм, в диапазоне толщин стружек $h$ = = 5…15 мм. Анализ экспериментальных данных позволяет сделать следующие выводы:

- средние силы резания (рис. 8, *а*) и удельные затраты энергии (рис. 8, *б*) для резцов РС-55 при реализации последовательной схемы в среднем на 20…40% ниже средних сил резания и удельных затрат энергии для резцов РС-14 и РП на всем диапазоне толщин стружки при соответствующих шагах резания;
- аналогичные результаты наблюдаются и при реализации шахматной схемы, при которой средние силы резания (рис. 8, *в*) и удельные затраты энергии (рис. 8, *г*) для резцов РС-55 в среднем на 15…40% ниже соответствующих параметров резания для РС-14 и РП;
- наблюдаемый при разрушении блоков гипса характер изменения сил резания и удельных затрат энергии от заданных шага резания и толщины стружки h подтверждает ранее сформулированную авторами [16—18] гипотезу о том, что удельные затраты энергии на разрушение блоков резцами РС-14 и РС-55 принимают минимальное значение при отношении шага резания к толщине стружки $t/h$ = 2… 4, так же как и для калийной соли;
- для резцов РП указанный рациональный диапазон отношений $t/h$ может быть расширен до значений $t/h$ = 3… 6.

Таким образом, принятые геометрические параметры перспективного резца РС-55, характеризующиеся полукруглой выпуклой формой режущей кромки и передней грани, на 15…40% снижают силовые и энергетические показатели процесса резания. Напротив, перспективный резец РП при небольших толщинах стружки ($h$ < 10…15 мм) характеризуется более высокими средними силами резания, что приводит к большим удельным затратам энергии, даже в сравнении с промышленным резцом РС-14. На основании этого можно предположить, что наибольшую эффективность применения резцов РП возможно обеспечить при реализации последовательной схемы с большой толщиной стружки ($h$ > 15 мм), в результате чего разрушение калийной руды будет происходить последовательными крупными сколами [19—21]. В то же время резец РП имеет три режущие грани, что положительно скажется на величине его наработки при установке на исполнительном органе комбайна.

Существенное снижение нагрузок на породоразрушающий инструмент и повышение эффективности процесса разрушения горных пород возможно обеспечить посредством оптимизации формы и геометрических параметров резцов.

**Выводы**

В результате экспериментов, проведенных на лабораторном режуще-испытательном стенде, выявлено, что наиболее благоприятные условия при разрушении горных пород, проявляющиеся в снижении силовых параметров и энергетических показателей процесса резания, обеспечиваются при использовании резцов с полукруглой выпуклой либо плоской формой передней грани, а также с полукруглой выпуклой формой режущей кромки.

Резцы типа РП с крышевидной формой передней грани и треугольной фор-

мой режущей кромки рационально применять при последовательной схеме резания с большими толщинами стружки.

Перспективным направлением развития темы исследования является проведение опытно-промышленных испытаний резцов РС-55 и РП в условиях калийных рудников, при установке на исполнительные органы проходческо-очистных комбайнов типа «Урал».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. *Старков Л. И.*, *Земсков А. Н.*, *Кондрашев П. И.* Развитие механизированной разработки калийных руд. — Пермь: ПГТУ, 2007. — 522 с.

2. *Кантович Л. И.*, *Клементьева И. Н.*, *Кузиев Д. А.* Обзор конструкций и технологических возможностей современных очистных комбайнов // Техника и технология горного дела. — 2020. — № 2. — С. 26—41. DOI: 10.26730/2618-7434-2020-2-26-41.

3. *Семенов В. В.*, *Мальчер М. А.*, *Петров В. П.*, *Морозов С. П.* Проходческо-очистные комбайны «Урал» для добычи калийной руды и каменной соли // Горное оборудование и электромеханика. — 2008. — № 8. — С. 17—21.

4. *Крапивин М. Г.*, *Раков И. Я.*, *Сысоев Н. И.* Горные инструменты. — М.: Недра, 1990. — 256 с.

5. *Трифанов Г. Д.*, *Куоза В. Д.* Взаимодействие планетарно-дискового органа горного комбайна с массивом в режиме подрубки пласта // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2023. — № 6. — С. 50—59. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-6-50-59.

6. *Грибов Д. С.*, *Просовский К. А.*, *Шишлянников Д. И.* Совершенствование породоразрушающего инструмента проходческо-очистных комбайнов калийных рудников / Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования: Материалы X Международной научно-практической конференции «Горная и нефтяная электромеханика–2024». — Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2024. — С. 57—64.

7. *Botyan E. Y.*, *Lavrenko S. A.*, *Pushkarev A. E.* Evaluation of complicated mining exploitation conditions influence on service life of open pit trucks suspensions with remote monitoring systems // International Journal of Engineering. 2024, vol. 37, no. 11, pp. 2268—2275. DOI: 10.5829/ije.2024.37.11b.12.

8. *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.

9. *Казаченко Г. В.*, *Басалай Г. А.*, *Гридюшко Д. В.* О разрушении горных пород механическим резанием // Горная механика и машиностроение. — 2022. — № 1. — С. 86—91.

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. *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.

12. *Бреннер В. А.*, *Зильберт В. С.*, *Зыков В. А.*, *Любощинский Д. М.* Режимы работы комбайнов для добычи калийных руд. — М.: Недра, 1978. — 216 с.

13. *Kharlamova N. A.*, *Konovalova M. A.* Relationship between crack length, wedge-shaped cutter geometry, and salt rocks viscosity in a cross-cutting scheme // Известия вузов. Горный журнал. — 2020. — № 8. — С. 26—34. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-8-26-34.

14. *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.

15. *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.

16. *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.

17. *Семенов В. В.* Обоснование и выбор параметров исполнительных органов проходческо-очистных комбайнов нового поколения для добычи калийных руд. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Тула, 2011. — 219 с.

18. *Abramovich B. N., Kuznetsov P. A. Sychev Y. A.* Protective controller against cascade outages with selective harmonic compensation function // Journal of Physics: Conference Series. 2018, vol. 1015, no. 2, article 022001. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/2/022001.

19. *Abramovich B. N., Sychev Y. A., Pelenev D. N.* Invariant protection of high-voltage electric motors of technological complexes at industrial enterprises at partial single-phase ground faults // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018, vol. 327, no. 5, article 052027. DOI: 10.1088/1757-899X/327/5/052027.

20. *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.

21. *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. ГИАБ

## REFERENCES

1. Starkov L. I., Zemskov A. N., Kondrashev P. I. *Razvitie mekhanizirovannoy razrabotki kaliynykh rud* [Development of potassium ore mining mechanization], Perm, PGTU, 2007, 522 p.

2. Kantovich L. I., Klementyeva I. N., Kuziev D. A. Design and technological capabilities of modern cutter-loaders: overview. *Journal of Mining and Geotechnical Engineering*. 2020, no. 2, pp. 26—41. [In Russ]. DOI: 10.26730/2618-7434-2020-2-26-41.

3. Semenov V. V., Malcher M. A., Petrov V. P., Morozov S. P. Mining and cleaning machines «Ural» for processing potash ore and rock salt. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2008, no. 8, pp. 17—21. [In Russ].

4. Krapivin M. G., Rakov I. Ya., Sysoev N. I. *Gornye instrumenty* [Mining tools], Moscow, Nedra, 1990, 256 p.

5. Trifanov G. D., Kuoza V. D. Interaction of the mining machine planetary-disc body with the rock mass in the undercutting mode. *Minerals and Mining Engineering*. 2023, no. 6, pp. 50—59. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-6-50-59.

6. Gribov D. S., Prosovsky K. A., Shishlyannikov D. I. Improvement of the rock-crushing tool for sinking and cleaning combines of potash mines. *Aktual'nye problemy povysheniya effektivnosti i bezopasnosti ekspluatatsii gornoshakhtnogo i neftepromyslovogo oborudovaniya: Materialy X Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Gornaya i neftyanaya elektromekhanika–2024»* [Actual problems of increasing the efficiency and safety of operation of mining and oilfield equipment: Materials of the X International Scientific and Practical Conference «Mining and Petroleum Electromechanics–2024»], Perm, Izd-vo PNIPU, 2024, pp. 57—64. [In Russ].

7. Botyan E. Y., Lavrenko S. A., Pushkarev A. E. Evaluation of complicated mining exploitation conditions influence on service life of open pit trucks suspensions with remote monitoring systems. *International Journal of Engineering*. 2024, vol. 37, no. 11, pp. 2268—2275. DOI: 10.5829/ije.2024.37.11b.12.

8. 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.

9. 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].

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. Evstratov V. A., Voronova E. Yu., Apachanov A. S., Grigoriev V. I., Sukharnikova V. A., Breslavtseva 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.

12. Brenner V. A., Zil'bert V. S., Zykov V. A., Lyuboshchinskiy D. M. *Rezhimy raboty kombaynov dlya dobychi kaliynykh rud* [Operating modes of combines for mining potash ores], Moscow, Nedra, 1978, 216 p.

13. Kharlamova N. A., Konovalova M. A. Relationship between crack length, wedge-shaped cutter geometry, and salt rocks viscosity in a cross-cutting scheme. *Minerals and Mining Engineering*. 2020, no. 8, pp. 26 — 34. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-8-26-34.

14. 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, no. 10, pp. 78 — 91. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_10_0_78.

15. 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.

16. Shishlyannikov D. I. *Sovershenstvovanie oborudovaniya i rezhimov raboty prokhodchesko-ochistnykh kombaynov kaliynykh 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.

17. Semenov V. V. *Obosnovanie i vybor parametrov ispolnitel'nykh organov prokhodchesko-ochistnykh kombaynov novogo pokoleniya dlya dobychi kaliynykh rud* [Rationale for the choice of parameters of the Executive bodies prohodcheskih harvesters of new generation for the extraction of potash ore], Candidate's thesis, Tula, 2011, 219 p.

18. Abramovich B. N., Kuznetsov P. A. Sychev Y. A. Protective controller against cascade outages with selective harmonic compensation function. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 1015, no. 2, article 022001. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/2/022001.

19. Abramovich B. N., Sychev Y. A., Pelenev D. N. Invariant protection of high-voltage electric motors of technological complexes at industrial enterprises at partial single-phase ground faults. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 327, no. 5, article 052027. DOI: 10.1088/1757-899X/327/5/052027.

20. 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 downhole conveyor. *Ugol'*. 2018, no. 2, pp. 32 — 35. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-2-32-35.

21. 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

*Грибов Дмитрий Сергеевич* — начальник горного отдела,
АО «ВНИИ Галургии», e-mail: dmitriy.gribov@mail.ru,
*Ситников Дмитрий Александрович*[1] — аспирант, e-mail: stdm2023@mail.ru,
*Шишлянников Дмитрий Игоревич*[1] — д-р техн. наук,
доцент, профессор, e-mail: dish844@gmail.com,
[1] Пермский национальный исследовательский политехнический университет.
**Для контактов:** Грибов Д.С., e-mail: dmitriy.gribov@mail.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*D.S. Gribov*, Head of the Mining Department, JSC «VNII Galurgii»,
190103, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: dmitriy.gribov@mail.ru,
*D.A. Sitnikov*[1], Graduate Student, e-mail: stdm2023@mail.ru,
*D.I. Shishlyannikov*[1], Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
Professor, e-mail: dish844@gmail.com,
[1] Perm National Research Polytechnic University, 614990, Perm, Russia.
**Corresponding author:** D.S. Gribov, e-mail: dmitriy.gribov@mail.ru.

Получена редакцией 02.06.2025; получена после рецензии 09.07.2025; принята к печати 10.10.2025.
Received by the editors 02.06.2025; received after the review 09.07.2025; accepted for printing 10.10.2025.