



ИНТЕРПРЕТАЦИЈА РЕЗУЛТАТА БУШЕЊА КРЕЧЊАКА
КОРИШЋЕЊЕМ E - S ДИЈАГРАМА

INTERPRETATION OF LIMESTONE DRILLING
RESULTS USING E - S DIAGRAMS

DOI: 10.5937/RG2502063K

Оригинални научни рад
Original Scientific Paper

Vítazoslav Krúpa
Mária Bali Hudáková
Edita Lazarová
Pavol Vavrek
Alexander Kiovský
Lucia Ivaničová

Институт за геотехнику
Словачке академије наука, Кошице, Словачка
krupa@saske.sk

Vítazoslav Krúpa
Mária Bali Hudáková
Edita Lazarová
Pavol Vavrek
Alexander Kiovský
Lucia Ivaničová

Institute of Geotechnics of the
Slovak Academy of Sciences, Košice, Slovakia
krupa@saske.sk

Примљен 10. 9. 2025; Рецензиран 22. 10. 2025; Прихваћен 24. 10. 2025.

Received 10 September 2025; Received in revised version 22 October 2025; Accepted 24 October 2025

Сажетак: Чланак се бави могућношћу процене процеса бушења у ефективној зони коришћењем E-S дијаграма. Експериментни су сироведени на лабораторијској платформи за бушење при бушењу кречњака помоћу двеју врста круна за бушење са површински постављеним глејом са дијамантском круном. Измерени подаци су обрађени нумеричким методама и упоређени са теоријским моделима, показујући високу сагласност између прорачуна и експеримента. Резултати су показали да се ефикасна зона бушења састоји од две фазе са различитом специфичном енергијом и снагом бушења. Поређење обеју круна за бушење указало је на упоредиву ефикасност распадања кречњака. Статистичка анализа је ипак ипак потврдила корисност коефицијента резања као индикатора оптимизације начина бушења. Предложена методологија има потенцијал за ширу примену у другим врстама stijena и може допринети оптимизацији технологија бушења у геотермалним бушотинама, рударству или инжењерској геологији.

Кључне речи: СПЕЦИФИЧНА ЕНЕРГИЈА; ЈАЧИНА БУШЕЊА; E - S ДИЈАГРАМ; КОЕФИЦИЈЕНТ РЕЗАЊА; ЕФЕКТИВНА ЗОНА БУШЕЊА

Abstract: The article deals with the possibility of evaluating the drilling process in the effective area using E-S diagrams. Experiments were carried out on a laboratory drilling rig when drilling limestone with surface-set diamond core drill bits of two types. The measured data were processed by numerical methods and compared with theoretical models, confirming a high agreement between calculations and experiment. The results showed that the efficient drilling area consists of two phases with different specific energy and drilling strength. Comparison of both drill bits indicated comparable efficiency of the limestone disintegration. Statistical analysis also confirmed the usefulness of the cutting coefficient as an indicator of drilling mode optimization. The proposed methodology has the potential for wider application in other types of rocks and can contribute to the optimization of drilling technologies in geothermal wells, mining or engineering geology.

Key words: SPECIFIC ENERGY; DRILLING STRENGTH; E - S DIAGRAM; CUTTING COEFFICIENT; EFFECTIVE DRILLING AREA

УВОД

У оквиру експерименталног истраживања распадања стена бушењем на нашем радном месту, јавила се потреба за креирањем методологије која ефикасно тумачи измерене величине и омогућава оптимизацију режима бушења. Циљ ове студије је анализа резултата бушења кречњака употребом длета малог пречника са дијамантском круном на лабораторијској платформи за бушење коришћењем E-S („специфична енергија“ – „јачина бушења“) дијаграма и повезаних индикатора ефикасности. Концепт специфичне енергије, дефинисане као енергије потребне за уклањање јединице запремине стене, један је од основних алата за процену ефикасности бушења још од Тиловог класичног рада [1] и још увек је основа за континуирано праћење и контролу процеса бушења [2, 3].

Са становишта физичке интерпретације, E-S дијаграм процењује напон током међусобне интеракције алата и стене користећи динамичке величине које су повезане са примењеним режимом бушења (сила/притисак, обртни момент и обртаји) и одговарајућу величину - дубину продирања (помак алата по обртају), чиме се ствара оквир за идентификацију ефективног режима бушења и кварова (нпр. Иступљење сеченица, прекомерно трење, поновно бушење фрагмената стене). Теоријски модели одзива бушења лопатастих длета квантификују односе између притиска, обртног момента, брзине продирања и угаоне брзине [4, 5], омогућавајући физички конзистентну интерпретацију емпиријских кривих у E-S простору. У оперативним условима, приступ процене механичке специфичне енергије показао се ефикасним у повећању брзине продирања (ROP) и дијагностиковању неефикасних услова [2, 6, 7].

Специфичности материјала значајно утичу на уочене трендове: код компактних стена (нпр. гранит), потрошња енергије је осетљива на параметре бушења и услове напрезања [8], док присуство или индукција микропукотина смањује потребну специфичну енергију [9, 10]. Штавише, класични радови показују разлику између статичких и динамичких тестова оптерећења силом [11], што

INTRODUCTION

In the framework of experimental research on rock disintegration by drilling at our workplace, there was a need to create a methodology that effectively interprets the measured quantities and allows for the optimization of the drilling regime. The aim of this study is to analyze the results of drilling limestone using small-diameter diamond core bits on a laboratory drilling rig using E-S (“specific energy” – “drilling strength”) diagrams and related efficiency indicators. The concept of specific energy, defined as the energy required to remove a unit volume of rock, has been one of the basic tools for evaluating drilling efficiency since Teale’s classic work [1] and is still the basis for continuous monitoring and control of the drilling process [2, 3].

From the point of view of physical interpretation, the E-S diagram evaluates the stress during the mutual interaction of the tool and the rock using dynamic quantities that are associated with the applied drilling mode (force/pressure, torque and revolutions) and the corresponding quantity - penetration depth (tool feed per revolution), thereby creating a framework for identifying the effective drilling mode and failures (e.g. blunting of cutting edges, excessive friction, re-biting of rock fragments). Theoretical models of drilling response of drag bits quantify the relationships between pressure, torque, the rate of penetration, and the angular velocity [4, 5], allowing a physically consistent interpretation of empirical curves in E-S space. In operational conditions, the mechanical specific energy assessment approach has proven to be effective in increasing the rate of penetration (ROP) and diagnosing inefficient conditions [2, 6, 7].

Material specificities significantly influence the observed trends: in compact rocks (e.g. granite), energy consumption is sensitive to drilling parameters and stress conditions [8], while the presence or induction of microcracks reduces the required specific energy [9, 10]. Furthermore, classical work shows the difference between static and dynamic force loading tests [11], which is important in transferring results from the laboratory to in

је важно при преношењу резултата из лабораторије у услове *in situ*. У том смислу, користимо E-S дијаграме и ефикасне границе зоне бушења како бисмо тумачили експерименте бушења кречњака и квантификовали оптималне параметре унутар фаза I/II.

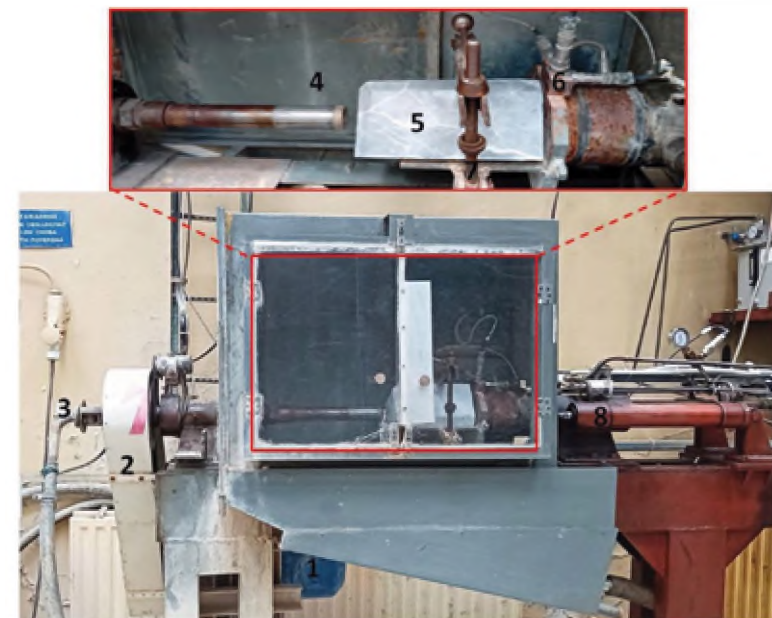
ЛАБОРАТОРИЈСКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДЕО И МЕТОДЕ

Експериментални програм је спроведен на хоризонталној платформи за бушење, Слика 1. Платформа за бушење се користи у истраживачке сврхе бушења и испитивања алата за бушење до пречника 59 mm. Платформа за бушење омогућава примену режима бушења са брзинама ротације до 2200 o/min и спољашњим оптерећењима до 20 kN са максималном дужином бушења једног узорка од 26 cm. Наша лабораторија је опремљена уређајима за мерење физичко-механичких својстава стена, мерење абразивности стена, мерење хабања дијамантских алата и мерење величине и облика фрагмената стена.

situ conditions. Against this background, we use E-S diagrams and efficient drilling area boundaries to interpret limestone drilling experiments and to quantify optimal parameters within phases I/II.

LABORATORY EXPERIMENTAL PART AND METHODS

The experimental program was carried out on a horizontal drilling rig, Figure 1. The drilling rig is used for research purposes of drilling and testing drilling tools up to a diameter of 59 mm. The drilling rig allows for the application of drilling modes with rotation speeds up to 2200 rpm and external loads up to 20 kN with a maximum drilled length of one sample of 26 cm. Our laboratory is equipped with devices for measuring the physical and mechanical properties of rocks, measuring the abrasiveness of rocks, measuring the wear of diamond tools and measuring the size and shape of rock fragments.



Слика 1, Експериментална платформа за бушење и њени главни делови
Figure 1, Experimental drilling rig and its main parts

Тумач: 1 - Електромотор; 2 - Каишни погон; 3 - Цево за довод течности за бушење;
4 - Језрена цев са круном за бушење; 5 - Узорак стене; 6 - Акцелерометри;

7 - Оквир за фиксирање узорка стене; 8 - Хидраулични цилиндри двоструког дејства.

Legend: 1 - Electromotor, 2 - Belt drive, 3 - Drilling fluid supply hose,
4 - Core barrel with drill bit, 5 - Rock specimen, 6 - Accelerometers,
7 - Rock specimen fixing frame, 8 - Double-acting hydraulic cylinders.

У овом раду се разматрају резултати експерименталног бушења кречњака длетом пречника 46 mm у константном режиму при примењеној брзини ротације $n = 1000$ o/min и спољашњем оптерећењу силом $F = 14$ kN. Коришћене су две површински постављене дијамантске круне за бушење: круна за бушење (16/25) и круна за бушење (25/40). Круна за бушење (16/25) има дијамантска зрна тежине 16–25 камена по карату, а круна за бушење (25/40) има дијамантска зрна тежине 25–40 камена по карату. Алати за бушење се састоје од три резна сегмента, са спољашњим пречником круне за бушење од 46 mm и унутрашњим пречником од 32 mm.

Приликом извођења сваког експеримента, испуњен је услов хомогености у погледу дужине бушотине једног узорка стене ($l=20$ cm), брзине ротације n и линеарно растућег оптерећења силом F до задате константне вредности. Седamnaest бушотина је направљено круном за бушење (16/25), а 27 бушотина је направљено круном за бушење (25/40). Свака бушотина је направљена на узорку кречњака из каменолома Вчеларе (Словачка), који је исечен кружном тестером кубног облика димензија 150x150x260 mm. Кречњак је компактан са измереном већом чврстоћом. То је седиментна стена састављена од калцита (калцијум карбонат, CaCO_3) који садржи минерале оксида гвожђа. Има релативно фину до средње грубу текстуру. Структура је углавном макрокристална, Слика 2. Измерена физичка и механичка својства кречњака приказана су у Табели 1.

This paper discusses the results of experimental drilling in limestone with bits of 46 mm diameter in a constant mode at an applied rotational speed $n = 1000$ rpm and an external force load $F = 14$ kN. Two surface-set diamond drill bits were used: drill bit (16/25) and drill bit (25/40). Drill bit (16/25) has diamond grains with a weight of 16–25 stones per carat and drill bit (25/40) has diamond grains with a weight of 25–40 stones per carat. The drilling tools consist of three cutting segments, with an outer diameter of the drill bit of 46 mm and an inner diameter of 32 mm.

When performing each experiment, the homogeneity condition was met regarding the length of the borehole of one rock sample ($l=20$ cm), the rotational speed n and the linearly increasing force load F up to set constant value. The seventeen boreholes were made with the drill bit (16/25) and 27 boreholes were made with the drill bit (25/40). Each borehole was made on a limestone sample from the Včeláre quarry (Slovakia), which was cut on a circular saw into a cuboid shape with dimensions of 150x150x260 mm. Limestone is compact with a measured higher strength. It is a sedimentary rock composed of calcite (calcium carbonate, CaCO_3) containing iron oxide minerals. It has a relatively fine to medium-coarse texture. The structure is mostly macrocrystalline, Figure 2. The measured physical and mechanical properties of limestone are shown in Table 1.



Слика 2, Структура кречњака из каменолома Вчеларе (Словачка)
Figure 2, The structure of limestone from the Včeláre quarry (Slovakia)

Табела 1, Особине кречњака
Table 1, Properties of limenstone

Статистичке вредности Statistical values	Запреминска тежина (kg.m ⁻³) Bulk density (kg.m ⁻³)	UCS (MPa) UCS (MPa)	Бразилски тест (MPa) Brazilian test (MPa)	HB (kg.mm ⁻²) HB (kg.mm ⁻²)	Ободно смицање (MPa) Punch shear (MPa)
Број процењених узорака Number of samples evaluated	14	15	10	10	10
Просечне Mean	2,691	85,1	9,3	466,4	9,5
Средње Median	2,691	77,8	9,5	457,1	10,0
Минимум Minimum	2,682	55,1	6,5	416,3	5,2
Максимум Maximum	2,702	119,2	10,8	521,8	14,2

Тумач: UCS - Једноосна чврстоћа на притисак, HB - Бринелов тест тврдоће, Бразилски тест - Индиректна затезна чврстоћа.
Legend: UCS - Uniaxial Compressive Strength, HB - Brinell Hardness Test, Brazilian Test - Indirect Tensile Strength.

Према словачкој техничкој норми ON 441121, кречњак има дефинисану вредност абразивности од 0,0186 mg.m⁻¹ и спада у стене са ниском абразивношћу.

According to Slovak technical norm ON 441121, limestone has a defined abrasiveness value of 0.0186 mg.m⁻¹ and belongs to rocks with low abrasiveness.

ОПИС ЕФИКАСНЕ ПОВРШИНЕ БУШЕЊА КОРИШЋЕЊЕМ Е-S ДИЈАГРАМА

DESCRIPTION OF THE EFFICIENT DRILLING AREA USING E-S DIAGRAMS

За квантитативно поређење алата за бушење коришћене су две методологије (16/25) и (25/40). Методологија Е-S дијаграма [5] и методологија за процену ефикасне зоне бушења са оптерећењем спољашњом силом у интервалу F од F_{inf} до 2F_{inf} [12].

Two methodologies were used for the quantitative comparison of drilling tools (16/25) and (25/40). The E-S diagram methodology [5] and the methodology for evaluating the efficient drilling area with external force loading in the interval F from F_{inf} to 2F_{inf} [12].

Е-S дијаграм графички приказује зависност специфичне енергије Е од чврстоће бушења S, где су Е и S две величине са димензијама напона које су пропорционалне обртном моменту Т и оптерећењу спољашњом силом F и обрнуто пропорционалне дубини реза p [5].

The E-S diagram graphically depicts the dependence of the specific energy E on the drilling strength S, where E and S are two quantities with stress dimensions that are proportional to the torque T and the external force load F and inversely proportional to the depth of cut p [5].

Специфична енергија Е је одређена изразом (1),

The specific energy E is determined by the expression (1),

$$E = \frac{2\pi}{A} \cdot \frac{T}{p} = \frac{2T}{(R^2 - r^2)p} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

где је:

A - константа која изражава површину контакта између алата и стене $A = \pi(R^2 - r^2)$, (mm²);

R - спољашњи полупречник машине за бушење, (mm);

r - унутрашњи полупречник машине за бушење, (mm);

p - дубина продирања (помак алата по обраћају), (mm);

T - обртни момент, (Nmm).

where:

A - constant expressing the surface area of the contact surface between the tool and the rock $A = \pi(R^2 - r^2)$, (mm²);

R - outer radius of the drill bit, (mm);

r - inner radius of the drill bit, (mm);

p - penetration depth (tool feed per revolution), (mm);

T - is the torque, (Nmm).

The drilling strength S is given by the relationship (2),

Снага бушења S дата је односом (2),

$$S = \frac{F}{(R-r)p} = \frac{F}{h.p} \text{ (MPa)} \quad (2)$$

где је:

h - ширина сегмента дефинисана као разлика између спољашњег и унутрашњег радијуса машине за бушење, (mm).

where:

h - segment width defined as the difference between the outer and inner radius of the drill bit, (mm).

Моделирање одзива из појединачних експерименталних бушења кречњачких бушотина може се директно повезати са варијабилношћу силе потиска F и дужином реза p дефинисањем ефективне површине бушења.

Modeling the response from individual experimental limestone borehole drillings can be directly linked to the variability of the thrust force F and the depth of cut p by defining the effective drilling area.

Ефикасна површина бушења се математички добија анализом једначина (3) и (4),

The efficient drilling area is obtained mathematically by analyzing the equations (3) and (4),

$$p(F) = p_{max} [1 - e^{-\omega F} (1 + \omega F)] \text{ (mm)} \quad (3)$$

$$T(F) = \kappa [F + \Theta (e^{\frac{F}{\Theta}} - 1)] \text{ (Nmm)} \quad (4)$$

који дефинишу криву зависности дубине продирања p од спољашњег оптерећења F и обртног момента T од F . Коefицијенти супституције p_{max} , ω , κ а Θ одређени су методом најмањих квадрата.

which define the dependence curve of the penetration depth p on the external load F and the torque T on F . The substitution coefficients p_{max} , ω , κ а Θ are determined by the least squares method.

Доња граница ефикасне зоне бушења је дефинисана спољашњим оптерећењем F_{inf} одређеним у тачки прегипа p - F криве, једначина (5).

The lower limit of the efficient drilling area is definition by the external load F_{inf} determined at the inflection point of the p - F curve, equation (5).

$$F_{inf} = \frac{l}{m} \text{ (N)} \quad (5)$$

Горња граница ефикасне зоне бушења је дефинисана као $F_2 = 2 F_{inf}$. Унутар ефективне зоне је вредност спољашњег оптерећења F_{opt} , што је аргумент минималне специфичне енергије.

Оптерећење F_{opt} дели ефикасну површину бушења на две фазе. Фазу I режима бушења (од F_{inf} до F_{opt}), где вредности E и S опадају са повећањем спољашњег оптерећења силом (подручје ефикасног распадања стена), и фазу II режима бушења (од F_{opt} до F_2), где вредности E и S такође расту са повећањем спољашњег оптерећења силом (подручје ефикасног распадања стена са додатним секундарним дробљењем већ распаданих остатака стене). Прелазна фаза је видљива између ових фаза. Фаза распадања стена има спољашња оптерећења од $F = 0$ до F_{inf} за механизам површинске абразије.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО И ТЕОРИЈСКИ ОБРАЂЕНИ РЕЗУЛТАТИ

Измерени експериментални подаци добијени бушењем кречњака коришћени су за израчунавање теоријских вредности дубине продирања и обртног момента коришћењем једначина (3) и (4) у MATLAB програму за сваки изведени експеримент. Експериментални и теоријски подаци имају веома високу корелациону чврстоћу, односно активно се филтрирају одступања експерименталних података узрокована неидентификованим „неисправним количинама“.

Израчунате криве E-S, према једначинама (1) - (2), засноване су на теоријским подацима бушења кречњака помоћу круне за бушење (16/25) након бушења 1,74 m, Слика 3.

Слика 3 приказује промене специфичне енергије E и отпора стене на распадање S са променама спољашњег оптерећења силом F . Означене тачке одређују величину силе F као аргумент минимума E и S .

The upper limit of the efficient drilling area is defined as $F_2 = 2 F_{inf}$. Inside the effective area is the value of the external load F_{opt} , which is the argument of the minimum specific energy.

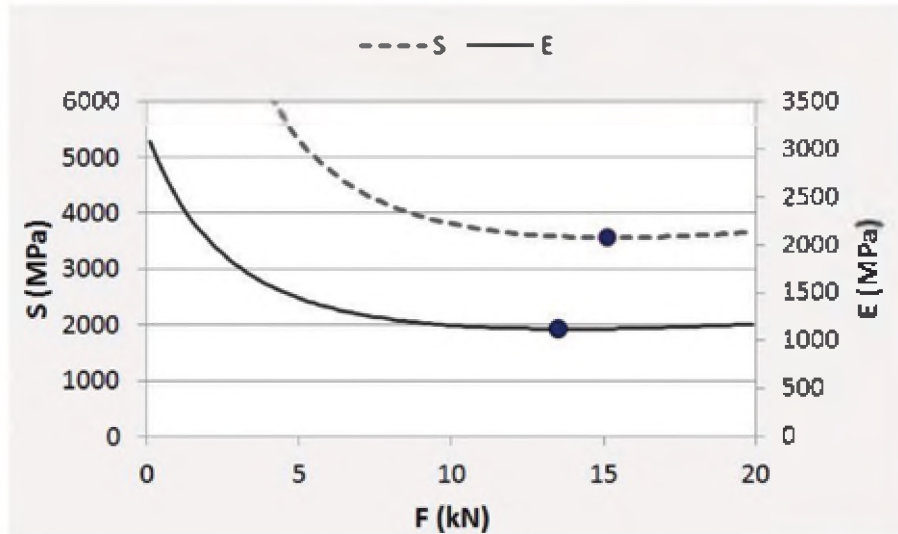
The load F_{opt} divides the efficient drilling area into two phases. Phase I of the drilling mode (from F_{inf} to F_{opt}), where the values of both E and S decrease with increasing external force load (area of efficient rock disintegration), and phase II of the drilling mode (from F_{opt} to F_2), where the values of E and S also increase with increasing external force load (area of efficient rock disintegration with added secondary crushing of already disintegrated rock debris). A transition phase is visible between these phases. Stage of the rock disintegration has external loads from $F = 0$ to F_{inf} for surface-abrasion mechanism.

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL PROCESSED RESULTS

The measured experimental data obtained from the limestone drilling were used to calculate the theoretical values of penetration depth and torque using equations (3) and (4) in the MATLAB program for each experiment performed. Experimental and theoretical data have a very high correlation tightness, that is, deviations of experimental data caused by unidentifiable „faulty quantities“ are actively filtered.

Calculated curves E-S, according to equations (1) - (2), are based on theoretical data from drilling limestone using a drill bit (16/25) after drilling 1.74 m, Figure 3.

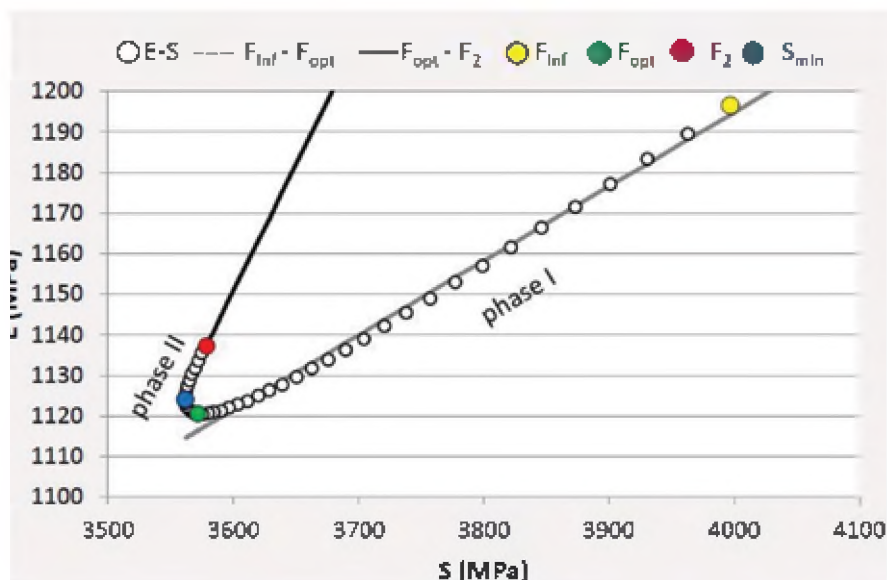
Figure 3 shows changes in specific energy E and rock resistance to desintegration S with changes in external force load F . The marked points determine the magnitude of force F as an argument of the minimum E and S .



Слика 3, Криве величина E и S у зависности од F
Figure 3, Curves of the quantities E and S depending on F

Слика 4 приказује промене величина E и S у области ефикасног распадања кречњака. У фази I, са повећањем спољашњег оптерећења од вредности F_{inf} до F_{opt} , вредности специфичне енергије и величине S смањују се на свој достижни минимум. Минимум и E и S налази се у прелазној фази између фаза I и II. Фаза II карактерише повећање вредности E и S са повећањем спољашњег оптерећења од вредности F_{opt} до F_2 .

Figure 4 presents the changes in the quantities E and S in area of the efficient limestone disintegration. In phase I, with the increase in the external load from the value F_{inf} to F_{opt} , the values of the specific energy and the quantity S decrease to their achievable minimum. The minimum of both E and S is found in the transition phase between phases I and II. Phase II is characterized by the increase in the values of E and S with the increase in the external load from the value F_{opt} to F_2 .



Слика 4, Промене вредности E и S у области ефикасније распада кречњака одређене за фазу I и фазу II
Figure 4, Changes of the values E and S in the more effective limestone disintegration region determined of the phase I and phase II

Теоријски прорачун за одабрани експеримент одредио је коефицијенте супституције једначина (3) и (4) и идентификовао следеће параметре ефективне површине бушења, видети Табела 2.

The theoretical calculation for the selected experiment determined the substitution coefficients of equations (3) and (4) and identified the following parameters of the effective drilling area, see Table 2.

Табела 2, Резултати експеримента бушења кречњака машином за бушење (16/25) на $L = 1,74$ m
Table 2, Results of an experiment drilling limestone with a drill bit (16/25) at $L = 1.74$ m

Параметри Parameters	Вредност Value	Напомене Notes
p_{max}	1,15 mm	Максимална дубина продирања, коефицијент супституције из једначине (3) Maximal penetration depth, the substitution coefficient from Eq. (3)
ω	0,1169 kN ⁻¹	Коефицијент супституције из једначине (3) The substitution coefficient from Eq. (3)
κ	6,57 mm	Коефицијент супституције из једначине (4) The substitution coefficient from Eq. (4)
Θ	0,9687 kN	Коефицијент супституције из једначине (4) The substitution coefficient from Eq. (4)
F_{inf}	8,556 kN → $p = 0,301$ mm	Доња граница зоне ефикасног бушења The lower boundary of the zone of efficient drilling
F_{opt}	14,1 kN → $p = 0,564$ mm	$1,648 \cdot F_{inf}$ аргумент минимума E $1.648 \cdot F_{inf}$ argument of the minimum E
F_2	17,11 kN → $p = 0,683$ mm	Горња граница зоне ефикасног бушења The upper boundary of the zone of efficient drilling
E_{min}	1,121 МПа при $F = 14,1$ kN 1,121 MPa at $F = 14,1$ kN	Минимална специфична енергија Minimum specific energy
S_{min}	3,562 МПа при $F = 15,1$ kN 3,562 MPa at $F = 15,1$ kN	Минимална јачина бушења Minimum drilling strength
E_{CP}	1,109 МПа	Вредност на врху резача Value at cutter point
S_{CP}	3,534 МПа	Вредност на врху резача Value at cutter point

Добијени односи између специфичне енергије и снаге бушења за круну за бушење (16/25):

- Фаза I: $E = 0,1834S + 461,62$;
- Фаза II: $E = 0,624S - 1.095,5$.

The resulting relationships between specific energy and drilling strength for drill bit (16/25):

- Phase I: $E = 0.1834S + 461.62$;
- Phase II: $E = 0.624S - 1,095.5$.

Напомена 1: Стољно оштрењење $F_{inf} = 8,556$ kN одговара дубини продирања $p = 0,301$ mm. Минимална специфична енергија $E_{min} = 1,121$ МПа има аргумент $F_{opt} = 14,1$ kN. Параметри E_{CP} и S_{CP} дају вредности специфичне енергије и чврстоће бушења на врху резача, тј. на пресеку линија фазе I и фазе II.

Note 1: The external load $F_{inf} = 8.556$ kN corresponds to a penetration depth $p = 0.301$ mm. The minimum specific energy $E_{min} = 1.121$ MPa has an argument $F_{opt} = 14.1$ kN. The parameters E_{CP} and S_{CP} give the values of the specific energy and drilling strength at the cutter point, i.e. at the intersection of the lines of phase I and phase II.

Са скоро истом дужином бушења $L=1,73\text{ m}$, резултати бушења кречњака круном за бушење (25/40) приказани су у Табели 3.

With almost the same length drilled $L=1.73\text{ m}$, the results of drilling limestone with a drill bit (25/40) are shown in Table 3.

Табела 3, Резултати експеримента бушења кречњака круном за бушење (25/40) на $L = 1,73\text{ m}$
Table 3, Results of an experiment drilling limestone with a drill bit (25/40) at $L = 1.73\text{ m}$

Параметри Parameters	Вредност Value	Напомене Note
P_{\max}	1,11 mm	Максимална дубина продирања, коефицијент супституције из једначине (3) Maximal penetration depth, the substitution coefficient from Eq. (3)
ω	0,1336 kN^{-1}	Коефицијент супституције из једначине (3) The substitution coefficient from Eq. (3)
κ	7,44 mm	Коефицијент супституције из једначине (4) The substitution coefficient from Eq. (4)
Θ	0,6769 kN	Коефицијент супституције из једначине (4) The substitution coefficient from Eq. (4)
F_{\inf}	7,484 kN $\rightarrow p = 0,294\text{ mm}$	Доња граница зоне ефикасног бушења The lower boundary of the zone of efficient drilling
F_{opt}	12,5 kN $\rightarrow p = 0,552\text{ mm}$	$1.67 \cdot F_{\inf}$ аргумент минимума E $1.67 \cdot F_{\inf}$ argument of the minimum E
F_2	14,97 kN $\rightarrow p = 0,665\text{ mm}$	Горња граница зоне ефикасног бушења The upper boundary of the zone of efficient drilling
E_{\min}	1,167 МПа при $F = 12,5\text{ kN}$ 1,167 МПа at $F = 12,5\text{ kN}$	Минимална специфична енергија Minimum specific energy
S_{\min}	3,231 МПа при $F = 14,1\text{ kN}$ 3,231 МПа at $F = 14,1\text{ kN}$	Минимална јачина бушења Minimum drilling strength
E_{CP}	1,150 МПа	Вредност на врху резача Value at cutter point
S_{CP}	3,180 МПа	Вредност на врху резача Value at cutter point

Добијени односи између специфичне енергије и снаге бушења за круну за бушење (25/40):

- Фаза I: $E = 0,2409S + 384,41$;
- Фаза II: $E = 0,4921S - 414,56$.

The resulting relationships between specific energy and drilling strength for drill bit (25/40):

- Phase I: $E = 0.2409S + 384.41$;
- Phase II: $E = 0.4921S - 414.56$.

Евалуацијом 17 узастопних експериментата бушења круном за бушење (16/25) и 27 експериментата са круном за бушење (25/40) добили смо просечне вредности екстрема (минимума) специфичне енергије E и снаге бушења S, које су приказане у Табели 4.

By evaluating the 17 subsequent drilling experiments with the drill bit (16/25) and the 27 experiments with the drill bit (25/40) we obtained the average values of the extremes (minima) of the specific energy E and the drilling strength S, which are presented in Table 4.

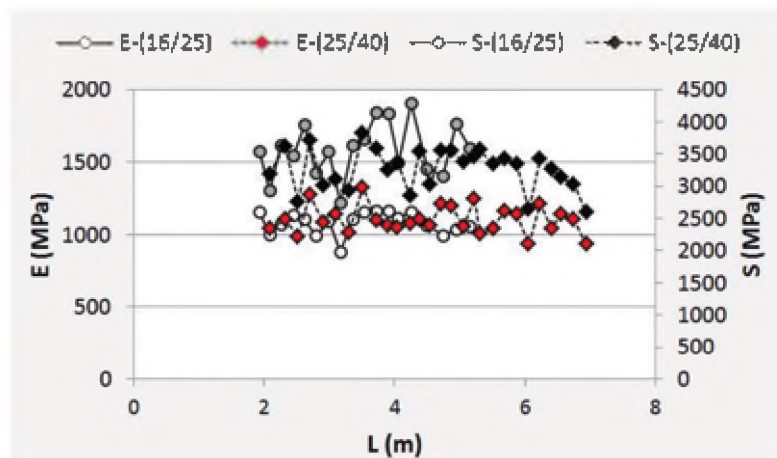
Табела 4, Просечне вредности специфичне енергије E и снаге бушења S постигнуте при бушењу кречњака круном за бушење (16/25) и (25/40)

Table 4, Average values of specific energy E and drilling strength S achieved when drilling limestone with (16/25) and (25/40) drill bits

Круна за бушење Drill bits	Специфична енергија E / Specific energy E (MPa)			Јачина бушења S / Drilling strength S (MPa)		
	Аритметичка средња вредност Arithmetic mean	Стандардно одступање Standard deviation	Просечна вредност Median	Аритметичка средња вредност Arithmetic mean	Стандардно одступање Standard deviation	Просечна вредност Median
16/25	1.084,736	75,835	1.104,034	3.532,136	400,991	3.538,662
25/40	1.102,519	94,710	1.093,267	3.267,816	316,145	3.347,523

Приликом бушења кречњака круном за бушење (16/25) са већим дијамантима, јачина бушења S је неповољнија, тј. стена пружа већи отпор бушењу. Предност круне за бушење (16/25) је мања вредност минималне достижне специфичне енергије E. Разлог за овај парадокс је тај што је оптимално спољашње оптерећење за круну за бушење (16/25) $F_{opt} = 15,81$ kN са просечном дубином продирања $p_{opt} = 0,633$ mm. Круна за бушење (25/40) са мањом величином дијаманата има оптималне вредности $F_{opt} = 13,86$ kN са $p_{opt} = 0,617$ mm. Међутим, разлике у вредностима минималне специфичне енергије E су незнатне и обе бургије машине за бушење су упоредиве по својој ефикасности при бушењу кречњака. Слика 5 приказује графичке резултате минималних вредности специфичне енергије E и јачине бушења S при бушењу кречњака.

When limestone drilling with drill bit (16/25) with larger size of diamonds the drilling strength S is less favorable, i.e. the rock offers greater resistance to drilling. The advantage of drill bit (16/25) is the smaller value of the minimum achievable specific energy E. The reason for this paradox is that the optimal external load for drill bit (16/25) is $F_{opt} = 15.81$ kN with an average penetration depth $p_{opt} = 0.633$ mm. Drill bit (25/40) with smaller size of diamonds has optimal values $F_{opt} = 13.86$ kN with $p_{opt} = 0.617$ mm. However, the differences in the values of the minimum specific energy E are insignificant and both drill bits are comparable in their efficiency in drilling limestone. Figure 5 show the graphical outputs of the minimal values of the specific energy E and the drilling strength S when drilling limestone.



Слика 5, Минималне вредности специфичне енергије E и јачине бушења S са повећањем дужине бушења L коришћењем круне за бушење (16/25) и круне за бушење (25/40)

Figure 5, Minimal values of specific energy E and drilling strength S with increasing drilled length L using drill bit (16/25) and drill bit (25/40)

Из резултата приказаних на слици 5, може се рећи да процес бушења састоји се од фаза опоравка и фаза опадања ефикасности бушења. Претпостављамо да је смањење величине E и S узроковано формирањем нових оштрих ивица дијаманата. Након њиховог формирања, процес раздвајања је ефикаснији све док се зрна дијаманта не исполирају и морају се поново формирати нове оштре ивице. Овај циклус се понавља. Израчунати однос E/S је пропорционалан μ , где је μ коефицијент резања, једначина (6).

$$\mu \sim \frac{E}{S} \quad (6)$$

Површина ефикасног распадања кречњака одређена је на основу израчунатих минималних вредности специфичне енергије E и чврстоће бушења S коришћењем једначина (1) и (2), слика 5. Након тога су израчунате регресионе једначине коефицијента резања $\mu = 0,8478 (E/S)$ за круну за бушење (16/25), а за круну за бушење (25/40) одређен је коефицијент резања $\mu = 0,847 (E/S)$. Коефицијенти детерминације $R^2 = 1$. Стога се може рећи да коефицијент резања μ представља приближно 85% односа E/S у оптималном режиму бушења.

У Табели 5 су израчунате статистичке карактеристике за коефицијент резања μ и однос E/S за коришћене машина за бушење.

From the results presented in Figure 5, it can be stated that the drilling process consists of recovery phases and decay phases of drilling efficiency. We assume that the decrease in the size of E and S is caused by the formation of new sharp edges of diamonds. After their formation, the separation process is more efficient until the diamond grains become polished and new sharp edges must be formed again. This cycle repeats. The calculated E/S ratio is proportional to μ , where μ is cutting coefficient, equation (6).

The area of the efficient limestone disintegration was determined based on the calculated minimum values of specific energy E and drilling strength S using equations (1) and (2), Figure 5. Subsequently were calculated the regression equations of the cutting coefficient $\mu = 0.8478.(E/S)$ for drill bit (16/25) and for drill bit (25/40) was determined the cutting coefficient $\mu = 0.847.(E/S)$. The coefficients of determination $R^2 = 1$. It can therefore be stated that the cutting coefficient μ represents approximately 85% of the E/S in the optimal drilling mode.

In Table 5, the statistical characteristics for the cutting coefficient μ and the E/S ratio for the drill bits used are calculated.

Табела 5, Средње вредности коефицијента резања μ и специфичног енергетског односа E и јачине бушења S постигнуте при бушењу кречњака са круном за бушење (16/25) и са круном за бушење (25/40)

Table 5, Mean values of cutting coefficient μ and specific energy ratio E and drilling strength S achieved when drilling limestone with drill bit (16/25) and drill bit (25/40)

Круна за бушење Drill bits	Коефицијент резања μ / Cutting coefficient μ			Однос E/S / E/S ratio		
	Аритметичка просечна вредност Arithmetic mean	Стандардно одступање Standard deviation	Средња вредност Median	Аритметичка просечна вредност Arithmetic mean	Стандардно одступање Standard deviation	Средња вредност Median
16/25	0,262	0,024	0,263	0,310	0,029	0,310
25/40	0,287	0,020	0,290	0,339	0,023	0,343

ДИСКУСИЈА

Експериментални резултати су показали да чак и у мање абразивним стенама као што је кречњак, промена геометрије дијамант-

DISCUSSION

The experimental results showed that even in less abrasive rocks such as limestone, the change in the geometry of diamond grains

ских зрна игра важну улогу у ефикасности бушења. Одступања од $\pm 10\%$ могу се приписати динамичким променама у резним ивицама (сеченицама), које се наизменично стварају и троше током бушења. Ова појава одговара запажањима других аутора приликом испитивања гранита [8, 9], где је ефекат био још израженији.

Још један аспект је погодност коришћења коефицијента резања као индикатора оптимизације режима бушења. Резултати указују на то да коефицијент добро описује однос специфичне енергије и снаге бушења чак и под променљивим условима. Питање преносивости методологије из лабораторијских услова у *in situ*, где су присутни други фактори као што су утицај шипки за бушење, температуре, притиска или присуства расхладних течности, остаје дискутабилно.

Са практичне перспективе, важно је да методологија омогућава идентификацију оптималних параметара бушења, што може допринети смањењу трошкова енергије и продужењу века трајања алата. У будућности се препоручује њена верификација на већем распону стена и у реалним теренским условима.

ЗАКЉУЧАК

Проширење евалуације ефикасне површине бушења коришћењем E-S дијаграма олакшало је тумачење фазе I и фазе II. Евалуирани експерименти бушења кречњака круном за бушење (16/25) и круном за бушење (25/40) доказују да је кречњак стена са ниским абразивним дејством и да су стога постигнути резултати само незнатно погођени хабањем машине за бушење. Ипак, стандардне девијације од око 10% вредности E и S указују на то да се и у овом случају дешавају промене у геометрији дијамантских зрна. Утврђено је да однос минималних вредности E и S одговара вредностима коефицијента резања μ .

ЗАХВАЛНИЦА

Ово истраживање је подржано пројектима VEGA 2/0090/23 и APVV-23-0364.

plays an important role in drilling efficiency. Deviations of $\pm 10\%$ can be attributed to dynamic changes in the cutting edges, which are alternately created and worn during drilling. This phenomenon corresponds to the observations of other authors when testing granites [8, 9], where the effect was even more pronounced.

Another aspect is the suitability of using the cutting coefficient as an indicator of drilling mode optimization. The results indicate that the coefficient well describes the ratio of specific energy and drilling strength even under changing conditions. The question of the transferability of the methodology from laboratory conditions to *in situ*, where other factors such as the influence of the drill string, temperature, pressure or the presence of cooling fluids, remains debatable.

From a practical perspective, it is important that the methodology allows for the identification of optimal drilling parameters, which can contribute to reducing energy costs and extending tool life. In the future, its verification on a larger range of rocks and in real field conditions is recommended.

CONCLUSION

The extension of the evaluation of the efficient drilling area using E-S diagrams made it easier to interpret phase I and phase II. The evaluated experiments of drilling limestone with drill bit (16/25) and drill bit (25/40) prove that limestone is a low abrasive rock and therefore the achieved results are only slightly affected by drill bit wear. Nevertheless, the standard deviations of about 10% of the E and S values indicate that changes in the geometry of diamond grains occur in this case as well. It was found that the ratio of the minimal values of E and S corresponds to the values of the cutting coefficient μ .

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by projects VEGA 2/0090/23 and APVV-23-0364.

ЛИТЕРАТУРА / LITERATURE

- [1] Teale R.: The concept of specific energy in rock drilling, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2(1), 1965, pp. 57–73 [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(65\)90022-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(65)90022-7).
- [2] Dupriest F. E., Koederitz W. L.: Maximizing drill rates with real-time surveillance of mechanical specific energy (SPE 92194), *Society of Petroleum Engineers*, 2005.
- [3] Bourgoyne Jr. A. T., Millheim K. K., Chenevert M. E., Young, F. S. Jr.: *Applied drilling engineering*. Society of Petroleum Engineers, 1991.
- [4] Detournay E., Defourny P.: A phenomenological model for the drilling action of drag bits. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 29(1), 1992, pp. 13–23, DOI: 10.1016/0148-9062(92)91041-3.
- [5] Detournay E., Richard T., Shepherd M.: Drilling response of drag bits: Theory and experiment. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(8), 2008, pp. 1347–1360, DOI: 10.1016/j.ijrmms.2008.01.001.
- [6] Dupriest F. E.: Comprehensive drill-rate management process to maximize rate of penetration (SPE-102210), *Society of Petroleum Engineers*, 2006.
- [7] Pessier R. C., Fear M. J.: Quantifying common drilling problems with mechanical specific energy and a bit-specific coefficient of sliding friction (SPE-24584), *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 1992.
- [8] Tang H., Liang D.-C., Wu Z.-J., Cheng X.: Energy analysis of intact granite based on test while drilling under different confining stresses and drilling parameters. *Frontiers in Earth Science*, 10, 1057187., 2023., DOI: 10.3389/feart.2022.1057187.
- [9] Ji Z.: Numerical analyses of the granite fragmentation in rotary-percussive drilling with consideration of pre-existing cracks, In *ARMA 2022 Symposium (Paper ARMA-2022-0874)*. OnePetro, 2022.
- [10] Kazi A., Riyaz M., Tang X., Staack D., Tai, B.: Reduction in specific energy of drilling granite through plasma-induced micro-fractures. *Procedia Manufacturing*, U.S. Department of Energy (OSTI), 48, 2020, pp. 1004–1011.
- [11] Lundquist R. G.: The effect of surface conditions on the specific energy of rock drilling, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 8(5), 1971, pp. 481–490, DOI: 10.1016/0148-9062(71)90046-5
- [12] Krúpa V., Kruláková M., Lazarová E., Labaš M., Feriančíková K., Ivaničová L.: Measurement, modeling and prediction of penetration depth in rotary drilling of rocks. *Measurement*, 117, 2018, pp. 165–175, DOI: 10.1016/j.measurement.2017.12.007.