

## ХІМІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 624.139.262

БАХТИН А. І., асп.; КРЮЧКОВ А. І., к.т.н., доц.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### ЗАЛЕЖНІСТЬ МОДУЛЯ НОРМАЛЬНОЇ ПРУЖНОСТІ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ ПРИ ПРОМЕРЗАННІ ГІРСЬКИХ ПОРІД

Процес промерзання ґрунтового шару завжди супроводжується формуванням додаткових полів напружень деформацій в ґрунті і контактуючих з ним об'єктах (борти та уступи кар'єра, трубопроводи, дороги та автомагістралі, фундаменти, стіни, тощо). При промерзанні приповерхневий шар ґрунту різко змінює швидкість проходження сейсмічних хвиль, свою міцність та здатність до поглинання сейсмічної енергії. Очевидно, що достовірна оцінка пружно-деформаційного стану в масиві ґрунту і взаємодіючих з ним конструкцій багато в чому залежить від точності прогнозу температурних полів в масиві гірських порід.

Пружні властивості гірських порід характеризуються модулем нормальної пружності, модулем зсуву та коефіцієнтом Пуассона. Модуль нормальної пружності (модуль Юнга) є показником здатності масивів чинити опір розтягу та стисненню при пружній деформації. Його величина залежить від мінералогічного складу, пористості породи, температури, вологості а також від виду деформації і величини прикладеного навантаження. Модуль нормальної пружності для мерзлих порід знаходиться в діапазоні 300 – 30 000 МПа, що в десятки і сотні разів більше модуля нормальної пружності немерзлих ґрунтів. При дослідженні фізико-механічних властивостей мерзлих ґрунтів важливо правильно охарактеризувати їх фізичний стан, визначити фазовий склад води, установити характеристики основних фізичних властивостей мерзлих ґрунтів і їх вплив на фізико – хімічні і фізичні процеси.

Для встановлення залежності зміни модуля нормальної пружності від температури використані експериментальні дослідження для вологонасичених мілкозернистого ( $d = 0.1 \div 0.25$  мм) та гравійового ( $d = 1 \div 0.5$  мм) пісків. Характер приведених в статті експериментальних залежностей наводить на думку, що існує єдина закономірність залежності модуля нормальної пружності від температури, яка може бути описана аналітично. Опіраючись на дослідження енергетичних переходів параметрів гірських порід при промерзанні, проведений аналіз показав, що залежність такого типу може бути представлена математичною моделлю, яка представлена в даній роботі. Як результат в даній статті встановлена закономірність зміни модуля нормальної пружності для водонасичених пісків при промерзанні ґрунтів з урахуванням їх температури яка описується подвійною експоненціальною залежністю і підтверджується експериментально.

В статті підтверджено, що на зміну модуля нормальної пружності суттєвим чином впливає температура гірського масиву. При зниженні температури модуль нормальної пружності для водонасичених гравійових та мілкодисперсних пісків зростає приблизно в 7 – 10 разів. Це явище зумовлене збільшенням міцності породи за рахунок утворення цементуючих полікристалічних льодових структур. При підвищенні негативної температури і при переході від грубодисперсних порід до тонкодисперсних і до льоду одна і та ж величина відносної деформації досягається при все більш малому напруженні.

Аналіз закономірності впливу температури гірського масиву на модуль нормальної пружності  $E$  (модуль Юнга) показав існування значного стрибкоподібного підвищення модуля при зниженні температури. При температурі приблизно нижче  $-10$  °С значення модуля нормальної пружності  $E$  незмінні, тому що фазові переходи вже не є суттєвими. При переході породи з мерзлого стану в талий величина  $E$  є незмінною і для більшості гірських порід знаходиться в інтервалі приблизно  $0,1 \div 10$  ГПа.

Практичне значення результатів дослідження в даній роботі визначається можливістю в польових умовах (на кар'єрі) виходячи з фактичних замірів температури ґрунту за допомогою отриманої аналітичної закономірності визначити модуль нормальної пружності та оцінити механічні, міцнісні та пружно-деформаційні властивості масиву гірських порід кар'єрного поля. В подальших дослідженнях для підвищення точності знаходження модуля Юнга та отримання ширшого розуміння міцнісних, механічних та пружно-деформаційних параметрів масиву гірських порід та мерзлих ґрунтів необхідно дослідити також вплив вологості, мінералізації та тріщинуватості на модуль нормальної пружності, а також включити їх як параметри аналітичної закономірності.

**Ключові слова:** модуль нормальної пружності, температура, гірська порода, промерзання.

DOI: 10.20535/2617-9741.1.2019.170878

© Бахтин А. І., Крючков А. І., 2019

**Постановка проблеми.** Ведення вибухових робіт несе підвищену небезпеку, здатну створювати загрозу багатофакторного ураження об'єктів, як на місці вибуху, так і на значних відстанях від нього. Особливо актуальним є питання збереження будівель неподалік кар'єру та його бортів.

Небезпека руйнування об'єктів, що охороняються, значно зростає при низьких температурах. Експериментальні дослідження показали, що на міцнісні та пружно-деформаційні характеристики порід значно впливають їх термодинамічні параметри. Цей факт потребує фізико-аналітичного підтвердження та розробки рекомендацій до зміни технології буро-вибухових робіт у відповідності зі зміною термодинамічних параметрів масиву на протязі року, що дозволить зменшити ризик порушення стійкості бортів кар'єру та забезпечить їх надійність на більший термін відпрацювання запасів корисних копалин кар'єрного поля.

Основною ознакою замерзання ґрунтів і гірських порід є кристалізація води в їх порах і утворення льоду. Процес кристалізації в ґрунтах супроводжується рядом складних фізико-хімічних явищ і процесів, що формують нові властивості мерзлих ґрунтів. Основний вплив на формування цих властивостей чинить цементация мінеральних часток льодом, що утворюється. Враховуючи це основною вихідною передумовою при постановці такого роду досліджень являється існування дуже тісної кореляційної залежності між пружними і міцнісними властивостями порід та їх температурою, вологістю та тріщинуватістю.

Визначення модулів пружності мерзлих порід і вивчення їх залежностей від різних чинників має важливе значення в фізиці гірських порід, так як до недавнього часу вони були мало досліджені. У той же час знання модулів пружності мерзлих порід необхідно при вирішенні багатьох питань інженерної геології та гірничої справи.

**Аналіз попередніх досліджень.** Значний об'єм експериментальних та теоретичних даних впливу від'ємних температур на пружно-деформаційні та механічні властивості гірських порід був отриманий в дослідженнях Ю. Д. Зикова, О. Д. Фролова, І. З. Дроговейка [1-3] та інших. Слід відзначити, що подібні експериментальні дослідження по визначенню динамічних модулів пружності були виконані на зразках піщано-глинистих порід в США Р. Стівенсоном [4] та Ч. Капларом [5], а також вченими з Канади, Франції, Японії та Китаю.

В результаті всі отримані дані повністю підтвердили базові закономірності температурної залежності, а також дозволили уточнити абсолютні значення модулів для конкретних порід, що досліджувалися. Загальною науковою проблемою вище описаних досліджень є вплив від'ємних температур на механічні, міцнісні та пружно-деформаційні властивості гірських порід та мерзлих ґрунтів. Однією з невирішених проблем є розробка аналітичної закономірності зміни модуля деформації від температури при промерзанні гірських порід.

**Метою статті** є встановлення закономірності та аналітичної залежності зміни модуля нормальної пружності від температури при промерзанні ґрунту.

**Виклад основного матеріалу.** Пружні властивості гірських порід характеризуються модулем пружності  $E$ , модулем зсуву  $\mu$  та коефіцієнтом Пуассона  $\nu$ . Модуль нормальної пружності (модуль Юнга) є показником здатності масивів чинити опір розтягу та стисненню при пружній деформації. Його величина залежить від мінералогічного складу, пористості породи, температури, вологості а також від виду деформації і величини прикладеного навантаження.

Зі збільшенням пористості модуль нормальної пружності гірських порід зменшується. При розтягуванні модуль пружності зменшується із збільшенням навантаження, при стискуванні – навпаки. Модуль нормальної пружності більшості осадових гірських порід менший від модуля нормальної пружності відповідних породоутворюючих мінералів.

На модуль пружності гірських порід впливає і їх текстура. Як правило, в породах з явно вираженою шаруватістю модуль пружності у напрямку шаруватості більший, ніж в напрямку, перпендикулярному шаруватості, а іноді спостерігається і зворотне явище.

В процесі промерзання породи просторова криогенна кристалізаційна структура зазнає суттєвих змін. Модулі пружності будуть в цьому випадку зростати внаслідок зменшення відкритої пористості, стиснення пор, а також товщини рідких шарів між частинками породи. Це зростання обумовлене не тільки збільшенням площі поверхні контактів твердої фази, але і зменшенням концентрації дефектів просторової структури.

При переході в мерзлий стан, тобто з виникненням полікристалічної криогенної решітки, відбувається різка стрибкоподібна зміна параметрів пружності з найбільшим температурним градієнтом для модуля Юнга 300 – 700% (в інтервалі температур  $0 \div -2$  °C) грубодисперсних порід: піски, супіски, піщаники [3].

Модуль нормальної пружності збільшується при зменшенні дисперсності мерзлих порід. Найбільшу величину модуля нормальної пружності має мерзлий пісок (820 – 22 500 МПа при температурі від -0,2 до -10,2°C), а найменшою - мерзла глина (680 – 2780 МПа при  $T = -1,2 \dots -8,4$ °C). Величини пілуватих супісків і суглинків мають проміжні значення. Істотний вплив на величину модуля нормальної пружності мерзлих порід чинить температура. Модуль пружності льоду менший модуля пружності ґрунтів з жорстким мінеральним скелетом (пісок), але значно перевершує модуль пружності мерзлих глин, що пов'язано з великою кількістю незамерзаючих води в них [3, 4].

Для встановлення залежності зміни модуля нормальної пружності від температури використані експериментальні дослідження для вологонасичених мілкозернистого ( $d = 0.1 \div 0.25$  мм) та гравійового ( $d = 1 \div 0.5$  мм) пісків (табл. 1) [3, 4].

Таблиця 1 – Залежність модуля нормальної пружності від температури вологонасичених пісків [3, 4]

$T, ^\circ\text{C}$	-20	-15	-10	-5	-2,5	0	5
$E(T)^{\text{ек}}$ , ГПа	Гравійовий пісок ( $d = 1 \div 0.5$ мм)						
	41,81	41,81	41,36	39,09	36,36	4,9	4,9
	Мілкозернистий пісок ( $d = 0.1 \div 0.25$ мм)						
	36,36	36,36	35	33,64	31,82	5,0	5,0

Характер приведених експериментальних залежностей нашою думкою, що існує єдина закономірність  $E = f(T)$ , яка може бути описана аналітично.

Опираючись на попередні дослідження енергетичних переходів параметрів гірських порід при промерзанні [6-8], проведений аналіз показав, що залежність такого типу може бути представлена в наступному вигляді:

$$E(T) = (E_{\max} - E_{\min}) \left\{ \exp \left[ -\exp \left( \frac{T - \theta_T}{\sigma_T} \right) \right] \right\} + E_{\min}, \quad (1)$$

де  $E_{\max}$  – максимальне стає значення модуля нормальної пружності при від'ємних температурах, ГПа;  $E_{\min}$  – мінімальне стає значення модуля нормальної пружності при додатних температурах, ГПа;  $T$  – поточне значення температури гірської породи, °C;  $\theta_T$  – параметр залежності, який відповідає максимальній інтенсивності переходу порід з мерзлого стану в талий, °C;  $\sigma_T$  – визначає діапазони температур переходу з замерзлого стану в талий.

Розрахункові параметри для вологонасичених пісків приведені в табл. 2.

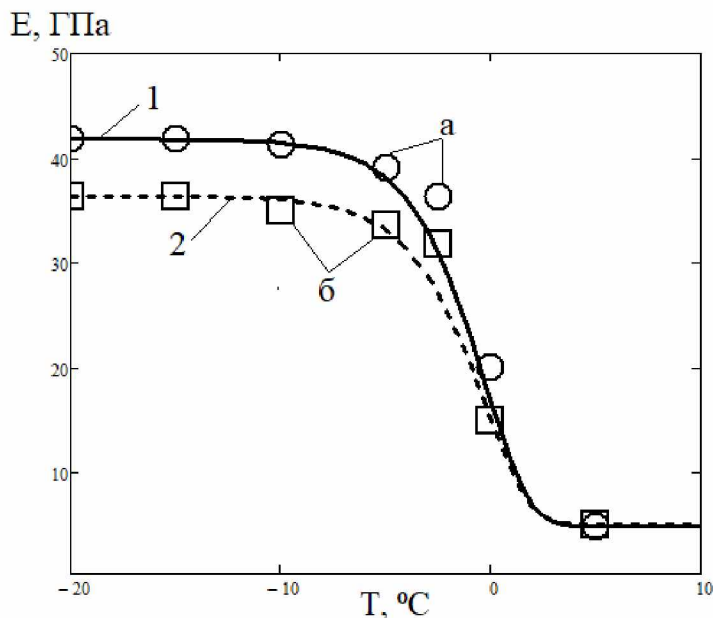
Таблиця 2 – Розрахункові параметри для розглянутої мерзлої породи

$d, \text{мм}$	$E_{\max}, \text{ГПа}$	$E_{\min}, \text{ГПа}$	$\theta_T, ^\circ\text{C}$	$\sigma_T, ^\circ\text{C}$
Гравійовий пісок				
1 ÷ 0.5	41,81	4,9	-0,25	2,12
Мілкозернистий пісок				
0.1 ÷ 0.25	36,36	5,0	-0,3	2,15

Враховуючи, що експериментальні точки лягають з невеликим відхиленням на аналітичну криву (рис.1) можна зробити висновок, що досліджувана експериментальна закономірність може бути описана аналітичною залежністю (1).

Аналіз закономірності впливу температури гірського масиву на модуль нормальної пружності  $E$  (модуль Юнга) показав існування значного стрибкоподібного підвищення модуля при зниженні температури. Це явище зумовлене збільшенням міцності породи за рахунок утворення цементуючих полікристалічних льодових структур. При температурі приблизно нижче -10 °C значення модуля

нормальної пружності  $E$  незмінні, тому що фазові переходи вже не є суттєвими. При переході породи з мерзлого стану в талий величина  $E$  є незмінною і для більшості гірських порід знаходиться в інтервалі приблизно  $0,1 \div 10$  ГПа. Максимальні значення модуля нормальної пружності для досліджених вологонасичених пісків при від'ємних температурах більші за мінімальні в 7 – 10 рази. При збільшенні щільності породи, модуль  $E$  також збільшується.



1, 2 – аналітичні залежності модуля нормальної пружності для гравійового та мілкодисперсного водонасичених пісків відповідно, побудовані за рівнянням (1);  
а, б – експериментальні значення модуля нормальної пружності для гравійового та мілкодисперсного водонасичених пісків відповідно [3, 4]

**Рис. 1 – Аналітична залежність значень модуля пружної деформації від температури**

Практичне значення результатів дослідження в даній роботі визначається можливістю в польових умовах (на кар'єрі) виходячи з фактичних замірів температури ґрунту модуль нормальної пружності та оцінити механічні, міцнісні та пружно-деформаційні властивості масиву гірських порід кар'єрного поля.

#### **Висновки**

1. На зміну модуля нормальної пружності суттєвим чином впливає температура гірського масиву. При зниженні температури модуль нормальної пружності для водонасичених гравієвих та мілкодисперсних пісків зростає приблизно в 7 – 10 разів. Це явище зумовлене збільшенням міцності породи за рахунок утворення цементуючих полікристалічних льодових структур.

2. При температурі приблизно нижче  $-10$  °C значення модуля нормальної пружності  $E$  для водонасичених пісків незмінні, тому що фазові переходи вологи вже не є суттєвими. При переході породи з мерзлого стану в талий величина  $E$  є незмінною і для більшості гірських порід знаходиться в інтервалі приблизно  $0,1 \div 10$  ГПа.

3. Встановлена закономірність зміни модуля нормальної пружності для водонасичених пісків при промерзанні ґрунтів з урахуванням їх температури, яка описується подвійною експоненціальною залежністю і підтверджується експериментально.

**Перспективи подальших досліджень.** Результати досліджень дозволяють отримати уявлення про основні закономірності зміни модуля нормальної пружності мерзлих порід. Ці результати свідчать також про існування більш складних залежностей пружних властивостей порід в мерзлому стані в порівнянні з

талим і про необхідність подальшого більш широкого і поглибленого вивчення впливу різних чинників на ці властивості з метою накопичення даних для розробки фізичної (механічної) моделі мерзлої породи. Окрім температури суттєвий вплив на модуль нормальної пружності здійснює тріщинуватість, мінералізація та вологість гірських порід. Тому для підвищення точності знаходження модуля Юнга та отримання ширшого розуміння міцнісних, механічних та пружно-деформаційних параметрів масиву гірських порід та мерзлих ґрунтів необхідно дослідити також вплив вологості, мінералізації та тріщинуватості на модуль нормальної пружності, а також включити їх як параметри аналітичної закономірності.

#### **Список використаної літератури**

1. Зыков Ю. Д. Акустические свойства мерзлых грунтов и льда / Ю. Д. Зыков, О. П. Красовский. – М.: Наука, 1989. – 133 с.
2. Фролов А. Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов / А. Д. Фролов. – Пущино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1998. – 515 с.
3. Дроговейко И. З. Разрушение мерзлых грунтов взрывом / И. З. Дроговейко. – М.: Недра, 1981. – 244 с.
4. Kaplar C. W. Some strength properties of frozen soil and effect of loading rate / C. W. Kaplar. – USA: CREEL, 1971. – 45 s.
5. Stevens H. W. The response of frozen soils to vibratory loads / H. W. Stevens. – USA: CREEL Technical Rap, 1975. – 98 s.
6. Крючков А. І. Закономірність швидкості розповсюдження повздовжніх сейсмічних хвиль в залежності від температури та вологості гірських порід / А. І. Крючков, А. І. Бахтин. // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія "Гірництво". – 2017. – №33. – С. 5–9.
7. Крючков А. І. Закономірність швидкості розповсюдження сейсмічних хвиль в залежності від температури та глибини промерзання ґрунту / А. І. Крючков, А. І. Бахтин. // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія "Гірництво". – 2017. – №34. – С. 5–9.
8. Крючков А. І. Закономірність зміни модулю зсуву в залежності від температури та пустотності гірських порід / А. І. Крючков, А. І. Бахтин // Сучасні ресурсозберігаючі технології гірничого виробництва. – 2018. – №21. – С. 18-28.

Надійшла до редакції 15.01.2019

---

*Bakhtyn A. I., Kriuchkov A. I.*

#### **DEPENDENCE OF THE MODULE OF NORMAL ELASTICITY FROM TEMPERATURES FOR THE FREEZING OF ROCKS**

*As a result of analytical and experimental studies, the regularity of the change of normal elasticity modulus (Young's module) is established when freezing a rock massif, which allows to predict their strength, mechanical and elastic-deformation properties. The existence of a jump-like increase in normal elasticity modulus of frozen soils with decreasing temperature has been established. Comparison of the results with the experimental data of other authors is carried out.*

*Elastic properties of rocks are characterized by a modulus of elasticity  $E$  and a Poisson coefficient  $\nu$ . The normal elastic modulus (Young's module) is an indicator of the ability of arrays to resist tensile and compression under elastic deformation. Its value depends on mineralogical composition, porosity of rock, temperature, humidity, as well as the type of deformation and magnitude of an applied load.*

*With increasing porosity, the module of normal elasticity of rocks decreases. When stretching the modulus of elasticity decreases with a load increasing, when compressing – on the contrary. The modulus of normal elasticity of most sedimentary rocks is less than the modulus of normal elasticity of the corresponding rock-forming minerals. The elasticity modulus of rocks affects their texture. As a rule, in rocks with obviously pronounced lamellar, the elasticity modulus is more in the direction of lamination than in the direction perpendicular to the lamination, and sometimes there is a reverse phenomenon.*

*In the process of rock freezing, the spatial cryogenic crystallization structure undergoes significant changes. In this case the elasticity modulus will increase as a result of reducing the open porosity, compression of pores, as well as the thickness of the liquid layers between particles of rock. This growth is not only due to the increase of the surface area of contacts of the solid phase, but also this is due to the decrease of concentration of the spatial structure defects.*



For the determination of dependence of the change of the modulus of normal elasticity on temperature, experimental studies have been used for wet-saturated fine-grained ( $d = 0.1 \div 0.25$  mm) and gravel ( $d = 1 \div 0.5$  mm) sands.

Upon transition to the frozen state, that is, with the emergence of a polycrystalline cryogenic lattice, a sharp jump-like change in the elasticity parameters with the greatest temperature gradient for the Young's modulus is  $300 \div 700\%$  (in the range of temperatures  $0 \div 2$  °C) of coarsely dispersed rocks such as sand, sub-particles, sandstones.

The nature of the reduced experimental dependences suggests that there is a single regularity of the dependence of the module of normal elasticity on temperature, which can be described analytically. Relying on previous studies of energy transitions of rock parameters during freezing, the analysis showed that the dependence of this type can be represented by the mathematical model presented in this paper. The established regularity of the change of the module of normal elasticity for water-saturated sands when freezing the soils, taking into account their temperature, is described by a double exponential dependence and confirmed experimentally.

The article confirms that the temperature of a rock mass is significantly influenced by the change of the modulus of normal elasticity. With a decrease in temperature, the module of normal elasticity for water-saturated gravel and fine-grained sands increases approximately in 7-10 times. This phenomenon is caused by an increase in the strength of the rock due to the formation of cementing polycrystalline ice structures.

The analysis of the law of the influence of the temperature of the rock mass on the modulus of normal elasticity (Young's module) showed the existence of a significant jump-like increase in the module with a decrease in temperature. This phenomenon is caused by an increase in the strength of the rock due to the formation of cementing polycrystalline ice structures. At temperatures below  $-10$  °C, the values of the modulus of normal elasticity are unchanged, because phase transitions are no longer significant. In the transition of a breed from a frozen state to the thawing value is unchanged and for most of the rocks is in the range of approximately  $0.1 \div 10$  GPa.

The practical significance of the results of the study in this paper is determined by the possibility in the field conditions (on a career basis) based on the actual measurements of the temperature of the soil, the module of normal elasticity and the mechanical, strength and elastic-deformation properties of the rock massif of the quarry field.

**Keywords:** module of normal elasticity, temperature, rock, freezing.

#### References:

1. Zykov Yu. D. Akustychni vlastyvoli merzlykh hruntiv i lodu / Yu. D. Zykov, O. P. Krasovskiy. – M: Nauka, 1989. – 133 s.
2. Frolov A. D. Elektrychni i pruzhni vlastyvoli merzlykh porid i lodu / A. D. Frolov. – Pushchynno: ONTI PNTs RAN, 1998. – 515 s.
3. Drohoveiko I. Z. Ruinuvannia merzlykh hruntiv vybukhom / I. Z. Drohoveiko. – M: Nadra, 1981. – 244 s.
4. Kaplar C. W. Some strength properties of frozen soil and effect of loading rate / C. W. Kaplar. – USA: CREEL, 1971. – 45 s.
5. Stevens H. W. The response of frozen soils to vibratory loads / H. W. Stevens. – USA: CREEL Technical Rap, 1975. – 98 s.
6. Kriuchkov A. I. Zakonomirnist shvydkosti rozpovsiudzhennia povzdovzhnikh seismichnykh khvyli v zalezhnosti vid temperatury ta volohosti hirskykh porid / A. I. Kriuchkov, A. I. Bakhtyn. // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy "Kyivskiy politekhnichnyi instytut". Serii "Hirnytsvo". – 2017. – №33. – S. 5–9.
7. Kriuchkov A. I. Zakonomirnist shvydkosti rozpovsiudzhennia seismichnykh khvyli v zalezhnosti vid temperatury ta hlybyny promerzannia gruntu / A. I. Kriuchkov, A. I. Bakhtyn. // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy "Kyivskiy politekhnichnyi instytut". Serii "Hirnytsvo". – 2017. – №34. – S. 5–9.
8. Kriuchkov A. I. Zakonomirnist zminy modulua zsuvu v zalezhnosti vid temperatury ta pustotnosti hirskykh porid / A. I. Kriuchkov, A. I. Bakhtyn. // Suchasni resursozberihaiuchi tekhnologii hirnychoho vyrobnytstva. – 2018. – №21. – S. 18–28.