

ВПЛИВ ЗМІНИ ПУСТОТНОСТІ І ТЕМПЕРАТУРИ НА КОЕФІЦІЄНТ ПУАССОНА ГІРСЬКИХ ПОРІД ТА СНІЖНО-ЛЬДОВИХ УТВОРЕНЬ

А. І. Крючков, А. І. Бахтин

НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: at_bahtin@i.ua

У результаті аналітичних та експериментальних досліджень встановлено закономірність зміни коефіцієнта Пуассона при промерзанні масиву гірських порід з урахуванням їх пустотності, яка дозволяє спрогнозувати їх міцнісні, механічні та пружно-деформаційні властивості при деформаціях розтягу та стиснення. Встановлено існування стрибкоподібного підвищення коефіцієнта Пуассона мерзлих ґрунтів та сніжно льодових утворень при збільшенні температури та зниженні пористості. Здійснено порівняння отриманих результатів з експериментальними даними інших авторів.

Ключові слова: коефіцієнт Пуассона, температура, пустотність, коефіцієнт пористості, мерзла гірська порода, сніжно-льодові утворення.

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПУСТОТНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА КОЭФФИЦИЕНТ ПУАССОНА ГОРНЫХ ПОРОД И СНЕЖНО-ЛЕДОВЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

А. И. Крючков, А. И. Бахтин

НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: at_bahtin@i.ua

В результате аналитических и экспериментальных исследований установлено закономерность изменения коэффициента Пуассона при промерзании массива горных пород с учетом их пустотности, которая позволяет спрогнозировать их прочностные, механические и упруго-деформационные свойства при деформациях растяжения и сжатия. Установлено существование скачкообразного повышения коэффициента Пуассона мерзлых грунтов и снежно-ледовых образований при увеличении температуры и снижения пористости. Проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными других авторов.

Ключевые слова: коэффициент Пуассона, температура, пустотность, коэффициент пористости, мерзлая горная порода, снежно-ледовые образования.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. 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 буровибухових робіт у відповідності зі змі-

ною 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 міцністними властивостями порід та їх температурою, вологістю та тріщинуватістю.

Метою даної роботи є встановлення закономірності та аналітичної залежності зміни коефіцієнта Пуассона від коефіцієнта пористості та температури ґрунту.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Коефіцієнт Пуассона є характеристикою речовини і характеризує зміну поперечних розмірів тіла при деформації розтягу або стиснення [1]. При зміні пустотності гірського масиву, вологості та температури промерзання коефіцієнт Пуассона значно змінюється.

Незважаючи на відмінності в мінеральному складі і будові піщано-глинистих порід в мерзлому стані, простежується залежність модулів пружності від гранулометричного складу породи, що в узагальненому вигляді відображає зміну вмісту незамерзаючої води, тобто складу і властивостей міжзернових зон в породах різного ступеня дисперсності [2, 3].

Розглянемо динамічний коефіцієнт Пуассона для мерзлих порід та сніжно-льодових утворень. Згідно з наявними експериментальними даними [4, 5, 6], ν для прісних мерзлих порід має слабку волого-температурну залежність. Основний вплив на величину ν чинить жорсткість між зернових зон, тобто вміст в них домішок і незамерзлої рідкої фази води. Тому величина ν повинна зменшуватися з пониженням температури, що підтверджується експериментами (табл. 1) [6].

Таблиця 1 – Залежність коефіцієнта Пуассона від температури сніжно-льодових утворень

$T, ^\circ\text{C}$	-20	-15	-10	-5	-1,5	0	5
$\nu(T)_{\text{ек.}}$	0,33	0,33	0,33	0,33	0,34	0,35	0,35

Характер експериментальних залежностей (табл. 1) нашоухує на думку, що існує єдина закономірність $\nu = f(T)$, яка може бути описана аналітично.

Опираючись на попередні дослідження енергетичних переходів параметрів гірських порід при промерзанні [7, 8, 9], проведений аналіз показав, що залежність такого типу може бути представлена в наступному вигляді:

$$\nu(T) = (\nu_{Tmax} - \nu_{Tmin}) \left\{ \exp \left[-\exp \left(\frac{\theta_T - T}{\sigma_T} \right) \right] \right\} + \nu_{Tmin}, \quad (1)$$

де ν_{Tmax} – максимальне встановлене значення коефіцієнта Пуассона при від'ємних температурах; ν_{Tmin} – мінімальне встановлене значення коефіцієнта

Пуассона при додатних температурах; T – поточне значення температури гірської породи, °С; θ_T – параметр залежності, який відповідає максимальній інтенсивності переходу порід з мерзлого стану в талий, °С; σ_T – визначає діапазони температур переходу з замерзлого стану в талий:

$$\sigma_T = \frac{\theta_T - T}{\ln[-\ln y]}, \quad (2)$$

$$y = \frac{\nu^{ек}(T) - \nu_{Tmin}}{\nu_{Tmax} - \nu_{Tmin}}. \quad (3)$$

Проведені розрахунки для сніжно-льодових утворень зі щільністю $\rho = 911 \text{ кг/м}^3$. Результати розрахунків параметрів приведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Розрахункові параметри розглянутих гірських порід

Параметр	ν_{Tmax}	ν_{Tmin}	$\theta_T, \text{°C}$	σ_T
Значення	0,35	0,33	-2,5	1,15

Використовуючи рівняння (1), розраховані значення коефіцієнта Пуассона на температурному діапазоні гірської породи від -20 °C до $+5 \text{ °C}$. Результати розрахунків представлені на рис. 1.

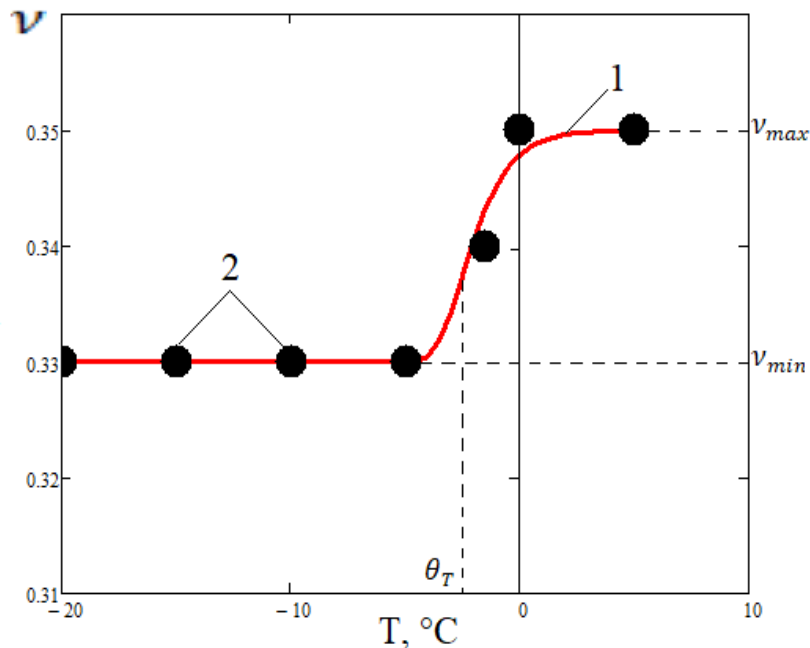


Рисунок 1 – Аналітична залежність значень коефіцієнта Пуассона від температури сніжно-льодових утворень:

- 1 – аналітична залежність коефіцієнта Пуассона побудована за рівнянням (1);
- 2 – експериментальна залежність коефіцієнта Пуассона

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

також ця залежність може бути використана для всіх гірських порід, що підлягають експериментальному дослідженню.

Окрім температури на зміну коефіцієнта Пуассона значний вплив чинить пустотність масиву.

В табл.3 представлені експериментальні значення [6, 10] коефіцієнта Пуассона від коефіцієнта пористості (K_p). Коефіцієнт пористості визначається за рівнянням (4) [6].

$$K_p = \frac{p}{1-p}, \quad (4)$$

$$p = \frac{\rho_{ТВ} - \rho_{л}}{\rho_{ТВ}}, \quad (5)$$

де K_p – коефіцієнт пористості чи приведена пористість ґрунту; p – пористість середовища; $\rho_{ТВ}$ – щільність масивного сухого льоду, кг/м^3 (917 кг/м^3); $\rho_{л}$ – щільність льодового утворення, кг/м^3 .

В даному випадку коефіцієнт пористості є характеристикою пустотності гірських порід, які досліджуються. Під пустотністю гірської породи необхідно розуміти всі види пустот (мікропори, пори, тріщини, порожнини), незалежно від їх форми, взаємного розташування і умов утворення.

Проведений аналіз показав, що експериментальна залежність, яка представлена в табл. 3, описується дещо видозміненим рівнянням (1).

Таблиця 3 – Залежність коефіцієнта Пуассона від коефіцієнта пористості для пористих сніжно-льодових утворень (при $T = -10 \div -15 \text{ }^\circ\text{C}$)

K_p	0,0065	0,1	0,4	1	4	5,5	7,5	10
$\nu(K_p)^{\text{ек.}}$	0,332	0,320	0,279	0,257	0,162	0,121	0,093	0,073

Тоді залежність коефіцієнта Пуассона від коефіцієнта пористості представлена рівнянням:

$$\nu(K_p) = (\nu_{Kpmax} - \nu_{Kpmin}) \left\{ \exp \left[-\exp \left(\frac{\lg(K_p) - \lg(\theta_{Kp})}{\lg(\sigma_{Kp})} \right) \right] \right\} + \nu_{Kpmin}, \quad (6)$$

де K_p – коефіцієнт пористості; θ_{Kp} – параметр залежності, який відповідає максимальній інтенсивності переходу порід великою пористістю до менш пористих; σ_{Kp} – визначає діапазони переходу порід з великою пористістю до менш пористих;

$$\sigma_{Kp} = \frac{(K_p - \theta_{Kp})}{\ln[-\ln y]}, \quad (7)$$

$$y = \frac{\nu^{\text{ек}}(K_p) - \nu_{Kpmin}}{\nu_{Kpmax} - \nu_{Kpmin}}. \quad (8)$$

Значення розрахункових параметрів приведені в табл. 4.

Таблиця 4 – Розрахункові параметри розглянутих гірських порід

Параметр	ν_{Kpmax}	ν_{Kpmin}	θ_{Kp}	σ_{Kp}
Значення	0,332	0,073	-6,4	3,5

Використовуючи рівняння (6), розраховані значення коефіцієнта Пуассона від коефіцієнта пористості. Результати розрахунків представлені на рис. 2.

Враховуючи, що експериментальні точки лягають з невеликим відхиленням на аналітичну криву, можна зробити висновки, що досліджувана експериментальна закономірність може бути описана аналітичною залежністю (6). Також ця залежність може бути використана для всіх мерзлих гірських порід, коефіцієнт пористості яких знаходиться в інтервалі ($K_p=0,0065 - 10$).

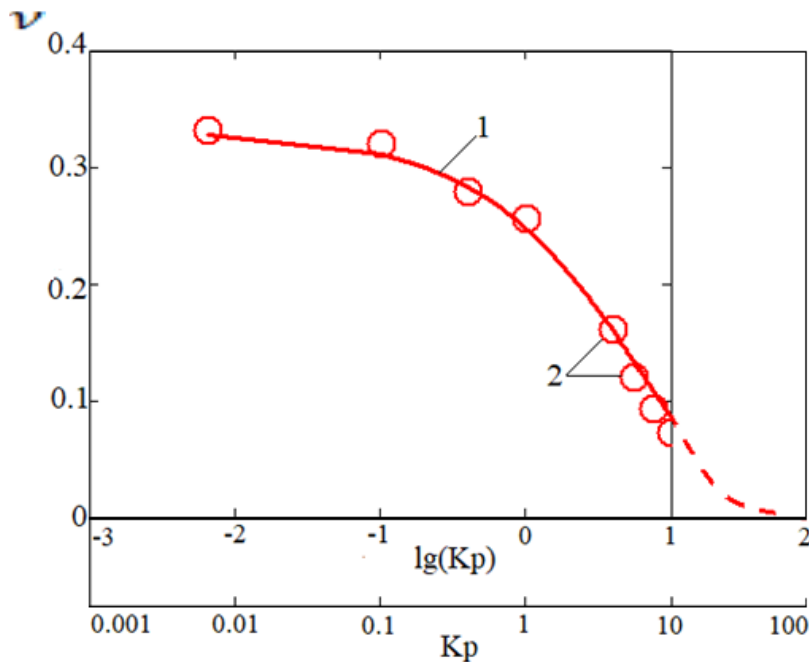


Рисунок 2 – Аналітична залежність значень коефіцієнтів Пуассона від коефіцієнта пористості для сніжно-льодових утворень:

- 1 – аналітична залежність коефіцієнтів Пуассона побудована за рівнянням (6);
- 2 – експериментальна залежність коефіцієнта Пуассона від коефіцієнта пористості

Враховуючи той факт, що залежність коефіцієнта Пуассона від коефіцієнта пористості та температури масиву описується однаковою математичною моделлю енергетичного переходу нестійкого стану речовини, існує єдина аналітична залежність спільного впливу температури та коефіцієнта пористості на зміну коефіцієнта Пуассона. Дана залежність представлена рівнянням:

$$\nu(T, K_p) = \sqrt{\nu(T) \cdot \nu(K_p)}. \quad (9)$$

Підставивши рівняння (1) та (6) у вираз (9) отримаємо єдину аналітичну залежність спільного впливу температури та коефіцієнта пористості на зміну коефіцієнта Пуассона:

$$\nu(T, K_p) = \left\{ \left(\nu_{Tmax} - \nu_{Tmin} \right) \left[\exp \left[-\exp \left(\frac{\theta_T - T}{\sigma_T} \right) \right] \right] + \nu_{Tmin} \right\} \times \left\{ \left(\nu_{Kpmax} - \nu_{Kpmin} \right) \exp \left[\lg \left(\frac{K_p}{\theta K_p} \right) \right] \lg \left(\frac{\sigma K_p}{\theta K_p} \right) + \nu_{Kpmin} \right\} \quad (10)$$

Для встановлення залежності коефіцієнта Пуассона від температури та коефіцієнта пористості використані експериментальні дослідження для сніжно-льодових утворень з коефіцієнтом пористості $K_p = 0,0065$ та щільністю $\rho = 911 \text{ кг/м}^3$.

Використовуючи рівняння (10) та розрахункові параметри з табл. 2 та табл. 4, розраховані значення коефіцієнта Пуассона в температурному діапазоні породи, що досліджується від $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ до $+5 \text{ }^\circ\text{C}$ для різних значень коефіцієнта пористості ($K_p=0,0065 - 10$). Результати розрахунків представлені на рис. 3.

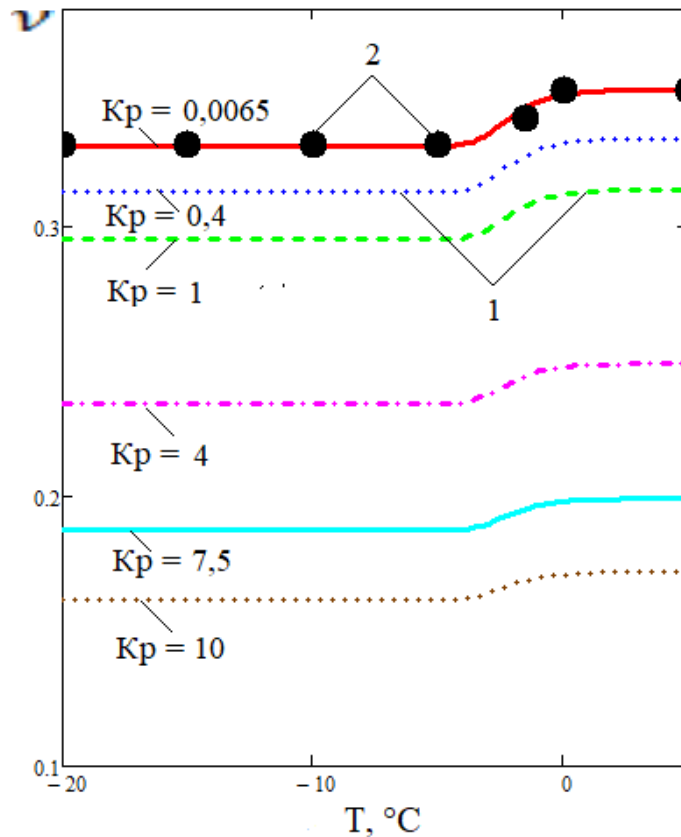


Рисунок 3 – Аналітична залежність значень коефіцієнтів Пуассона від температури при різних значеннях коефіцієнта пористості сніжно-льодових утворень:

- 1 – аналітичні залежності (суцільні лінії) коефіцієнтів Пуассона побудовані за рівнянням (10);
- 2 – експериментальні значення коефіцієнту Пуассона для сніжно-льодових утворень

ВИСНОВКИ. Встановлена закономірність зміни коефіцієнта Пуассона при промерзанні масиву гірських порід з урахуванням їх пустотності, яка описується подвійною експоненціальною залежністю, і підтверджується експериментально.

Одержана закономірність дозволяє спрогнозувати міцнісні, механічні та пружно-деформаційні властивості порід при деформаціях розтягу та стиснення.

При промерзанні масиву гірських порід та сніжно-льодових утворень, коефіцієнт Пуассона знижується в 1,3 – 2 рази.

Окрім зниження температури найбільше на зміну коефіцієнта Пуассона впливає пустотність масиву. При збільшені пустотності (переходу від мікропор до тріщин та порожнин) коефіцієнт Пуассона знижується приблизно в 2 – 2,5 рази. Це пояснюється збільшенням анізотропії гірського масиву, що призводить до зниження здатності гірських порід протидіяти деформаціям розтягу та стиснення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Каркашадзе Г.Г. Механическое разрушение горных пород. М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2004. 222 с.
2. Достовалов Б.Н. Общее мерзлотоведение. М.: МГУ, 2004. 512 с.
3. Роман Л.Т. Механика мерзлых грунтов. М.: МАИК «Наука / Интерпериодика», 2002. 426 с.
4. Воронков О.К., Моторин Т.А., Михайловский Г.В., Кунцевич С.П. Сейсмогеологические классификации грунтов криолитозоны. *Криосфера Земли*. 1997. № 3. С. 47–54.
5. Зыков Ю.Д., Червинская О.П., Фролов А.Д. Характерные черты деформируемости мерзлых засоленных грунтов. *Криосфера Земли*. № 3. 1999. С. 61–65.
6. Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. Пущино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1998. 515 с.
7. Крючков А.І., Бахтин А.І. Закономірність швидкості розповсюдження повздовжніх сейсмічних хвиль в залежності від температури та вологості гірських порід. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія «Гірництво». 2017. № 33. С. 5–9.
8. Крючков А.І., Бахтин А.І. Закономірність швидкості розповсюдження сейсмічних хвиль в залежності від температури та глибини промерзання ґрунту. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія «Гірництво». 2017. № 34. С. 5–9.
9. Крючков А.І., Бахтин А.І. Закономірність зміни модулю зсуву в залежності від температури та пустотності гірських порід. *Сучасні ресурсозберігаючі технології гірничого виробництва. Науково-виробничий збірник*. Кременчук: КрНУ, 2018. № 21. С. 18–28.
10. Ершов Э.Д. Основы геокриологии. М: МГУ, 2001. 688 с.

**THE INFLUENCE OF THE VOIDNESS AND TEMPERATURE'S CHANGES
TO THE POISSON'S COEFFICIENT OF THE MOUNTAIN BREED
AND SNOW-ICE FORMATIONS**

A. Kriuchkov, A. Bakhtyn

NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

prosp. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: at_bakhtin@i.ua

Purpose. The purpose of this work is to establish the patterns and analytical dependence of the Poisson's coefficient variation on the porosity and temperature coefficient of the soil. **Methodology.** An analysis of experimental data for the influence of the temperature and porosity change of a rock mass on the Poisson's coefficient has been carried out. Also the Poisson's coefficient dependence on temperature and mountain breed's voidness is done. The comparing of the received results with the experimental data of the other authors is carried out. **Findings.** The existence of the jump-like increase of Poisson's coefficient of frozen rocks and snow-ice formations with increasing temperature and decrease of voidness has been established. It was established that when array of rocks and snow-ice formations freezes, the Poisson coefficient decreases by 1.3 - 2 times. It's also done that except the temperature, the voidness also affects on Poisson's coefficient. With increasing voidness (transition from micropore to cracks and cavities), the Poisson coefficient is significantly reduced by about 2 – 2,5 times. **Originality.** Math module is developed on dependence of Poisson's coefficient on temperature and snowy-iced formations based on experimental and theoretical data, the feature is in that it takes into account the temperature mettness and the coefficient of porosity. This model is correct for all frozen mountain breeds and snowy-iced formations. **Practical value.** Practical value of the survey results in this work is determined by opportunity in field conditions (in open-cast mine), based on actual measurement of the temperature and coefficient of porosity is to determine the mountain breed Poisson's coefficient during freezing, to sum up the energy influence of explosions on objects, that are guarded and to predict their stability conditions. **Conclusions.** Installed regularity of the Poisson's coefficient changes for snowy-iced formations during ground freezing with account on its voidness and temperature which describes the double exponential dependence and confirmed by experiment.

Key words: Poisson's coefficient, temperature, voidness, porosity coefficient, frozen mountain breed, snowy-ice formation.

REFERENCES

1. Karkashadze, G.G. (2004) *Mehanicheskoe razrushenie gorniyh porod* [Mechanical destruction of rocks], Publishing house of the Moscow State Mining University, Moscow, Russia.
2. Dostovalov, B.N. (2004) *Obschee merzlotovedenie*, MSU, Moscow, Russia.
3. Roman, L.T. (2002) *Mehanika merzlyih gruntov* [Mechanics of frozen soils], Pleiades Publishing, Moscow, Russia.
4. Voronkov, O.K., Motorin, T.A., Mihaylovskiy, G.V., Kuntsevich, S.P. (1997) "Seismogeological classification of cryolite soil", *Nauchnyy zhurnal "Kriosfera zemli"*, no. 3, pp. 47–54.

5. Zyikov, Yu.D., Chervinskaya, O.P., Frolov, A.D. (1999) "Characteristic features of deformability of frozen saline soils", *Nauchnyy zhurnal "Kriosfera zemli"*, no. 3, pp. 61–65.

6. Frolov, A.D. (1998) *Elektricheskiye i uprugkiye svoystva merzlykh porod i ldov* [Electric and elastic properties of frozen earth materials], ONTI PSC RAS, Pushchino, Russia.

7. Kriuchkov, A.I., Bakhtyn, A.I. (2017) "The Pattern of velocity expansion of the seismic waves depending on the temperature and humidity of rock", *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy "Kyivskiy politekhnichnyi instytut". Seriya "Hirnystvo"*, no. 33, pp. 5–9.

8. Kriuchkov, A.I., Bakhtyn, A.I. (2017) "The Pattern of velocity expansion of the longitudinal seismic waves depending on the temperature and depth of rock", *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy "Kyivskiy politekhnichnyi instytut". Seriya "Hirnystvo"*, no. 34, pp. 5–9.

9. Kriuchkov, A.I., Bakhtyn, A.I. (2018) "The regularity of the shift module change depending on temperature and voidness of mountain breed", *Suchasni resursozberihaiuchi tekhnolohii hirnychoho vyrobnytstva*, no. 21, pp. 18–28.

10. Ershov, E.D. (2002) *Osnovy geokriologii* [General geocryology], MSU, Moscow, Russia.

Стаття надійшла 17.12.2018.