

### УМОВИ ФОРМУВАННЯ ХВИЛЕПРОВОДУ В БАГАТОШАРОВОМУ ГІРСЬКОМУ МАСИВІ

**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 ході аналітичних та експериментальних досліджень встановлено закономірність зміни температурних полів в криогенному та незамерзлому шарах масиву від температури його поверхні. Описано аналітичними залежностями закономірність зміни швидкості сейсмічних хвиль по глибині криогенного масиву з урахуванням вологості та температури його поверхні, які відображають її з необхідною точністю. Виявлено та описано умови формування хвилепроводу в багатошаровому масиві гірських порід, а також обґрунтована необхідність врахування цих умов при оцінці стійкості бортів кар'єру та об'єктів, що охороняються.

**Ключові слова:** криогенна порода, глибина промерзання, температура, швидкість сейсмічних хвиль, амплітуда, борт кар'єру.

### УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВОЛНОПРОВОДА В МНОГОСЛОЙНОМ ГОРНОМ МАССИВЕ

**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 ходе аналитических и экспериментальных исследований установлена закономерность изменения температурных полей в криогенном и незамерзшем слоях массива от температуры его поверхности. Описана аналитическими зависимостями закономерность изменения скорости сейсмических волн по глубине криогенного массива с учетом влажности и температуры его поверхности, отражающие ее с необходимой точностью. Установлены и описаны условия формирования волнопровода в многослойном массиве горных пород, а также обоснована необходимость учета этих условий при оценке устойчивости бортов карьера и охраняемых объектов.

**Ключевые слова:** криогенная порода, глубина промерзания, температура, скорость сейсмических волн, амплитуда, борт карьера.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Відомо, що процес промерзання та відтаювання завжди супроводжується формуванням та зміною полів напружень та деформацій в масиві та контактуючих з ним об'єктів (житлові будинки, борти кар'єра, трубопроводи, тощо).

Для оцінки пружно-деформаційних властивостей порід часто використовуються методи, які засновані на дослідженні сейсмічних хвиль, тому що акустичні параметри фізично взаємопов'язані із пружними та механічними.

Основна частина енергії сейсмічних хвиль, що розповсюджується від місця вибуху до об'єктів, що охороняються, зосереджена у відносно вузькому діапазоні частотно-амплітудного спектра коливань. Гірська порода, незамерзлий та кри-

огенний шар саме визначають ці діапазони, формуючи в масиві певний хвилепровід.

Промерзання ґрунту при від'ємних температурах на поверхні змінюється від максимальної величини до нуля з переходом до додатних температур на відповідній глибині. Цей процес вимагає встановлення профілю зміни швидкості та енергії сейсмічних хвиль від глибини з урахуванням температури, вологості, пористості та складу гірської породи при забезпеченні стійкості бортів кар'єру та об'єктів, що охороняються.

На глибину формування кріогенного шару та розподіл швидкості сейсмічних хвиль впливають температура навколишнього середовища, вологість, мінералізація та пористість масиву, хімічний та морфологічний склад порід, наявність та висота снігового покриву, рівень ґрунтових вод, рельєф місцевості, характер рослинного покриву, а також інші фактори.

Метою дослідження є встановлення впливу промерзання поверхневого шару ґрунту на стійкість борта кар'єру та формування специфічних умов розвитку тріщин в хвилепроводі з незамерзлим ґрунтом під дією сейсмічних хвиль з високою концентрацією енергії.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Очевидно, що достовірна оцінка механічних та термодинамічних властивостей кріогенного масиву і взаємодіючих з ним об'єктів, що охороняються, багато в чому залежить від точності прогнозу температурних полів.

Для оцінки зміни температурних полів в кріогенному та незамерзлому шарах масиву від глибини і температури поверхні використані експериментальні дані [1, 2], що представлені на рис. 1.

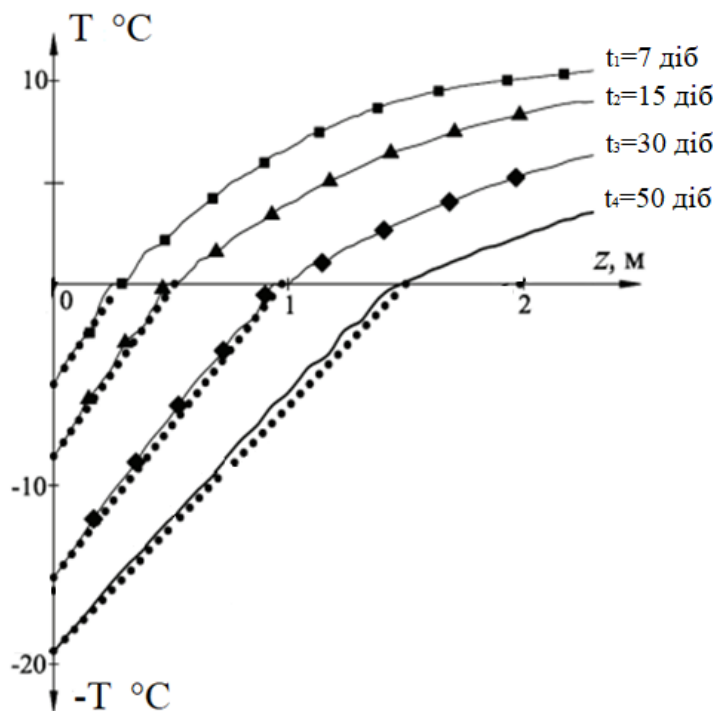


Рисунок 1 – Зміна температури ґрунту з глибиною при промерзанні [1, 2]

Проведений аналіз результатів досліджень [3, 4] показав, що залежність такого типу можна представити у вигляді рівняння:

$$T_r(z; T_n) \approx T_n(1 - A \cdot z), \text{ } ^\circ\text{C} \quad (T_n < 0^\circ\text{C}), \quad (0 \leq z < 2), \quad (1)$$

де  $T_r(z; T_n)$  – температура ґрунту на глибині  $z$ ;  $z$  – глибина залягання шару ґрунту, м;  $A$  – температурний коефіцієнт (для Київської області  $A \approx 1/2$ );  $T_n$  – температура поверхні,  $^\circ\text{C}$

З початком кристалізації вологи у скелеті ґрунтів, тобто при переході значень температури через нуль і подальше її зниження, відбувається характерне для усіх криогенних порід стрибкоподібне підвищення швидкості та енергії сейсмічних хвиль. Величина цього стрибка визначається типом ґрунту, його вологістю, мінералізацією та пористістю.

Для встановлення залежності швидкості розповсюдження сейсмічних хвиль від температури використані експериментальні дослідження [5, 6, 7] для засоленних дрібнозернистих пилюватих пісків при вологості  $W=10, 16, 21\%$  при фіксованому значенню мінералізації  $1\%$  (табл. 1).

Таблиця 1 – Залежність швидкості повздовжніх сейсмічних хвиль від температури мерзлих порід [5, 6, 7]

$T, \text{ } ^\circ\text{C}$	-20	-15	-10	-5	-2	-0,5	0
$C_p, \text{ м/с}$	Вологість ( $W = 10\%$ ); Мінералізація – $1\%$						
	3400	3250	1600	650	550	500	500
	Вологість ( $W = 16\%$ ); Мінералізація – $1\%$						
	3800	3750	2250	750	650	600	600
	Вологість ( $W = 21\%$ ); Мінералізація – $1\%$						
	4250	4200	2750	1100	800	700	700

Опираючись на попередні експериментальні та аналітичні дослідження зміни механічних властивостей криогенних порід [3, 8, 9], проведений аналіз показав, що залежності в табл. 1 можуть бути представлені в наступному вигляді:

$$C_p(T) = (C_{max} - C_{min}) \left\{ \exp \left[ -\exp \left( \frac{T - \theta_c}{\sigma_c} \right) \right] \right\} + C_{min}, \quad (2)$$

де  $C_{max}$ , – максимальне стає значення швидкості сейсмічних хвиль при від’ємних температурах, м/с;  $C_{min}$  – мінімальне стає значення швидкості поперечних хвиль при додатніх температурах, м/с;  $T$  – поточне значення температури гірської породи,  $^\circ\text{C}$ ;  $\theta_c$  – параметр залежності, який відповідає температурі при умові  $\frac{\partial^2 C_p(T)}{\partial T^2} = 0$  і відповідає максимальній інтенсивності переходу порід з мерзлого стану в талий і навпаки,  $^\circ\text{C}$ ;  $\sigma_c$  – визначає діапазони температур переходу з замерзлого стану в талий,  $^\circ\text{C}$ .

Розрахункові параметри для розглянутої породи приведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Розрахункові параметри для розглянутої мерзлої породи

$T_{п}, ^\circ\text{C}$	$A$	$C_{max}, \text{м/с}$	$C_{min}, \text{м/с}$	$\theta_c, ^\circ\text{C}$	$\sigma_c, ^\circ\text{C}$
-20	0,5	Вологість ( $W = 10\%$ ); Мінералізація – 1%			
		3400	500	-9,0	3,0
		Вологість ( $W = 16\%$ ); Мінералізація – 1%			
		3800	600	-8,4	2,2
		Вологість ( $W = 21\%$ ); Мінералізація – 1%			
		4250	700	-7,6	2,4

Використовуючи рівняння (1) та (2), а також розрахункові параметри (табл. 2) одержимо залежність зміни швидкості повздовжніх хвиль від глибини промерзання ґрунту  $z$  (рис. 2, а):

$$C_p(T_{п}, z) = (C_{max} - C_{min}) \left\{ \exp \left[ -\exp \left( \frac{(T_{п}(1-A \cdot z) - \theta_c)}{\sigma_c} \right) \right] \right\} + C_{min}. \quad (3)$$

Як бачимо, на ділянці криогенного шару масиву (AB) швидкість сейсмічних хвиль зменшується при збільшенні глибини. Це пояснюється тим, що при збільшенні глибини криогенного масиву його температура зростає, що в свою чергу призводить до зниження його модуля пружності, а також менш суттєвими стають фазові переходи вологи, збільшується кількість незамерзлої води.

На ділянці (BC) властивості масиву наближаються до властивостей скельної породи, знижується пористість та збільшується щільність, що відповідно призводить до зростання швидкості, амплітуди та енергії сейсмічної хвилі.

В т. В маємо мінімальне значення швидкості повздовжніх хвиль  $C_{min}$  при температурі  $0^\circ\text{C}$ .

На ділянці (CD) відбувається перехід до скельної породи. В т. D не відбуваються процеси, які б впливали на зміну швидкості сейсмічної хвилі, тому для скельної породи вона постійна і залежить лише від типу, структури породи, її щільності та пористості. Для граніту швидкість повздовжніх хвиль  $C_p \approx 5000 \text{ м/с}$ .

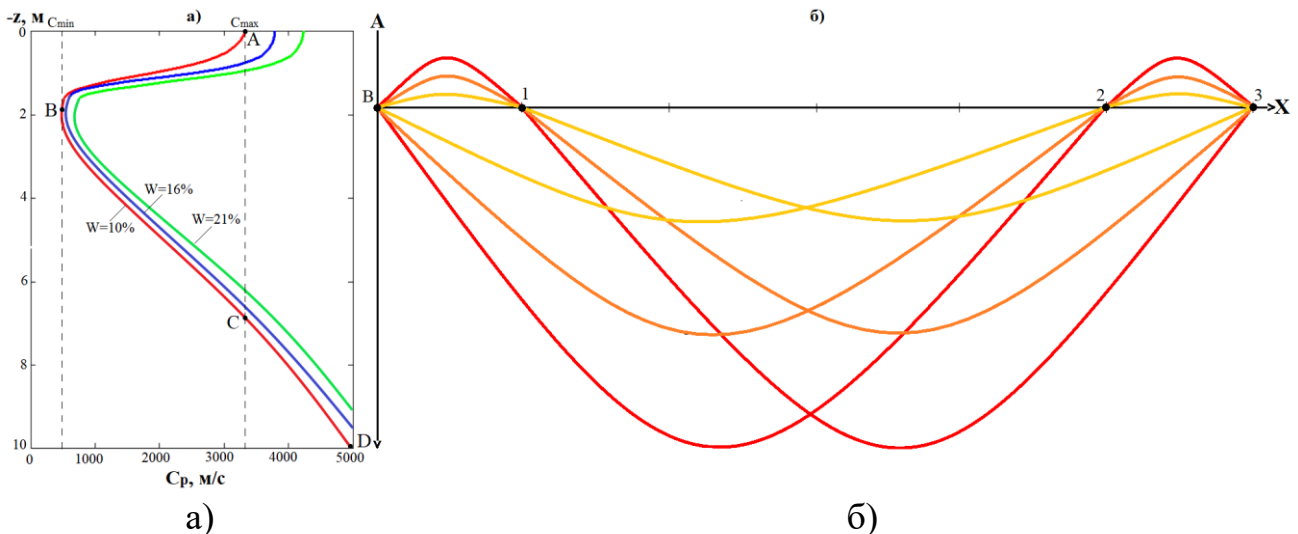


Рисунок 2 – Профіль швидкості повздовжніх хвиль по глибині масиву (а); фокусування променів в несиметричному хвилепроводі (б)

Встановлена картина промерзання борта кар'єру при лінзоподібній формі профіля швидкості по глибині призводить до формування характерного хвилепроводу в якому промені викривляються, відбиваються та фокусуються в характерних точках при проходженні по усьому каналу (рис. 2, б). В даному випадку різко зростає можливість формування та виникнення стоячих хвиль. Такі хвилі, в будь-якій фазі коливань не поширюються в просторі. Характерною особливістю таких хвиль є наявність у них вузлів у яких амплітуда хвилі дорівнює нулю, та пучностей, в яких амплітуда максимальна, причому положення вузлів і пучностей лишається незмінними у просторі. Тобто висока енергія не поширюється по масиві, а з поступовим поглинанням чинить локальну руйнівну дію на тій ділянці у якій утворився вузол і що, призводить до зародження та розвитку тріщин.

На рис. 3 схематично представлена структура стоячих сейсмічних хвиль в несиметричному гірському хвилепроводі при промерзанні.

Не зважаючи на зміцнюючий характер криогенної породи уступів формуються ділянки з високою концентрацією енергії по осі каналу (фокуси), що призводить до виникнення критичних значень дотичного напруження зсуву та розвитку тріщин плоского зсуву (тип 2 по Ірвіну [10]), які при проведенні чергового масового вибуху будуть збільшувати свою довжину до критичного значення, формуючи площину сковзання призми обвалу борта з виникненням класичного зсуву.

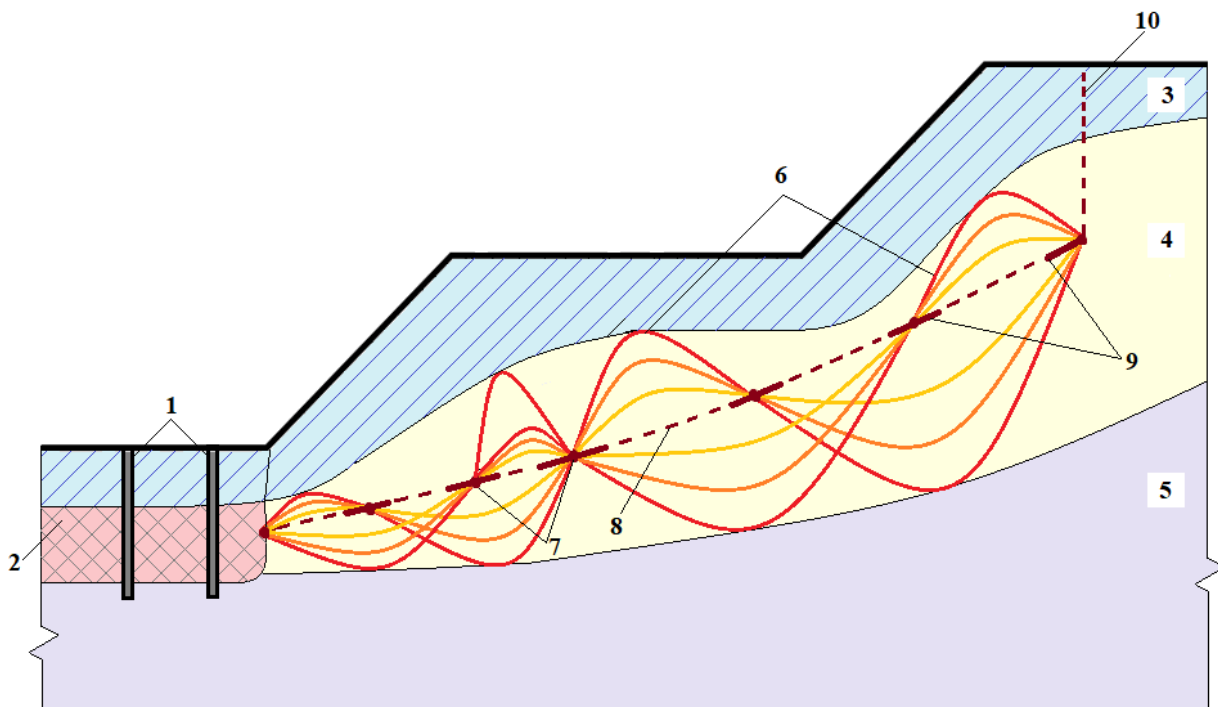


Рисунок 3 – Формування хвильового несиметричного каналу в гірському масиві борта кар'єра при промерзанні: 1 – заряд вибухової речовини (ВР); 2 – сейсмічний осередок вибуху (СОВ); 3 – промерзлий шар ґрунту; 4 – незамерзлий ґрунт; 5 – скельна порода; 6 – амплітуди коливань сейсмічних хвиль під час вибуху; 7 – вузли частотно – коливальної гармоніки сейсмічних хвиль (мінімальна амплітуда та максимальна енергія); 8 – лінія сковзання призми обвалу борта; 9 – місця інтенсивного утворення тріщин зсуву; 10 – місце утворення тріщини на розрив

Таким чином замерзлий шар ґрунту (AB), незамерзлий шар ґрунту (BC) та шар скельної породи (CD) створюють каналні умови проходження сейсмічних хвиль та умови формування поверхні зсуву, що обов'язково необхідно враховувати при оцінці стійкості бортів кар'єру та об'єктів, що охороняються.

**ВИСНОВКИ.** 1. Встановлено, що промерзання верхнього шару ґрунту в комплексі з незамерзлим шаром ґрунту нижче глибини промерзання, а також шар скельних порід формують специфічний розподіл швидкості сейсмічних хвиль по глибині борта кар'єру (рис. 3).

2. У верхньому промерзломому шарі ґрунту швидкість повздовжніх хвиль складає  $3000 \div 4000$  м/с, що в  $5 \div 8$  разів більше швидкості хвиль у непромерзломому ґрунті.

3. Таке стрибкоподібне підвищення швидкості хвиль є загальною закономірністю, яка аналітично описується подвійною експонентою і експериментально підтверджується для різних порід в різних умовах.

4. При промерзанні верхнього шару ґрунту його питома акустична провідність збільшується, що призводить до зростання щільності потоку енергії сейсмічних хвиль та сприяє передачі хвильової енергії на більшу відстань з меншим затуханням і таким чином збільшується ризик руйнування об'єктів, які охороняються.

5. В нижньому непромерзломому шарі ґрунту формуються умови для розвитку як бігучих, так і стоячих сейсмічних хвиль з груповою швидкістю  $0 \div 300$  м/с. Стоячі хвилі не переносять сейсмічну енергію в глибину борта, а вона поглинається в шарі, де вони сформувалися.

6. Кожним наступним вибухом доля стоячих хвиль зростає, що призводить до формування і періодичного розвитку стійких тріщин по площині зсуву в місцях фокусування сейсмічної енергії в шарі ґрунту з температурою близькою  $0$  °С.

7. Через деякий час тріщини плоского зсуву, які утворилися на площині зсуву об'єднуються, що призводить до формування граничного напруженого стану ґрунту і розвитку зсуву з усіма наслідками.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Тер-Мартиросян З. Г., Горбачев П. А. Промерзание ґрунта с учетом переменной температуры на поверхности и фазовых переходов в интервале температур. Вестник МГСУ. 2012. № 1. С. 32–36.

2. Фельдман Г. М. Методы расчета температурного режима мерзлых ґрунтов. М.: Наука, 1973. 254 с.

3. 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.

4. Schiesser W. E. The Numerical Method of Lines: Integration of Partial Differential Equations. San Diego: Academic Press, 1991. 326 p.

5. Дроговейко И. З. Разрушение мерзлых ґрунтов взрывом. М.: Недра, 1981. 244 с.

6. Фролов А. Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. Пушино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1998. 515 с.
7. Ершов Э. Д. Основы геокриологии. М: МГУ, 2001. 688 с.
8. 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.
9. Крючков А. І., Бахтин А. І. Закономірність зміни модулю зсуву в залежності від температури та пористості гірських порід. *Сучасні ресурсозберігаючі технології гірничого виробництва*. 2018. № 21. С. 18–28.
10. Степанова Л. В. Математические методы механики разрушения. М: ФИЗМАЛИТ, 2009. 336 с.

## CONDITIONS OF WAVE CHANNEL FORMATION IN MULTILAYER MASSIF OF ROCKS

**A. Kriuchkov, A. Bakhtyn**

NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

prosp. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: at\_bahtin@i.ua

**Purpose.** The purpose of the study is to determine the effect of freezing of the surface layer of soil on the stability of the quarry side and the formation of specific conditions for the development of cracks in the wave channel with non-frozen soil under the influence of seismic waves with high energy concentration. **Methodology.** An analysis of experimental data was carried out to evaluate the change of temperature fields in cryogenic and non-frozen rocks from the depth and temperature of the surface, as well as to determine the dependence of the velocity change of longitudinal seismic waves on the freezing depth and soil moisture. **Results.** It was established that freezing of the upper layer of soil in a complex with an ice-free layer of soil below the freezing depth and a layer of rocks form a specific distribution of the velocity of seismic waves along the depth of the quarry side. In the upper frozen soil layer, the velocity of longitudinal waves is  $3000 \div 4000$  m / s, which is  $5 \div 8$  times the speed of waves in non-frozen soil. Such a jump-like increase in the velocity of waves is a general law that is analytically described by a dual exponential and is experimentally confirmed for different breeds in different conditions. **Originality.** In the paper, the author has established the regularity of temperature change of the cryogenic and non-frozen layer in depth, depending on the surface temperature for the climatic conditions of the Kiev and Zhytomyr regions. A mathematical model for changing the velocity of longitudinal seismic waves in depth is developed, depending on the temperature of the surface and the moisture content of the massif. A picture of freezing the side of a quarry with a lens-shaped profile of velocity profile in depth and conditions for the formation of a characteristic wave channel is established. Conditions for the formation of standing waves and formation of flat shear cracks in the wave channel are described. **Practical value.** In this paper, the necessity of developing and improving existing entropy criteria of the stability of the quarry sides is determined, which are that they take into account the thermodynamic parameters of the rock massif and do not depend on its loading regime. This criterion is a complex indicator covering a wide range of factors that

affect the stability of the quarry sides. This criterion will allow continuous and rapid control of the state of the massif of rocks, its strength and elastic-deformation properties, the conditions for the propagation of seismic waves energy with the help of non-complex measurements. **Conclusions.** The multilayer massif of rocks (AD) creates channel conditions for the passage of seismic waves, which must necessarily be taken into account when assessing the stability of the sides of the quarry and protected objects. In the wave channel, the possibility of the emergence and formation of standing waves increases sharply. At the same time, very high energy does not propagate through the massif, and is gradually absorbed and exerts a locally destructive effect on the part where the wave channel was formed.

**Key words:** cryogenic rock; freezing depth; temperature; seismic waves velocity; amplitude; quarry slope.

#### REFERENCES

1. Ter-Martirosjan, Z. G., Gorbachev, P. A. (2012) "Heat transfer in freezing ground in account of variable temperature on daylight surface and phase change in temperature interval", *Vestnik MGSU*, no. 1, pp. 32–36.
2. Feldman, G. M. (1973) *Metody rascheta temperaturnogo rezhima merzlykh gruntov* [Methods for calculating the temperature regime of frozen soils], Nauka, Moscow, Russia.
3. 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.
4. Schiesser, W. E. (1991) *The Numerical Method of Lines: Integration of Partial Differential Equations*, Academic Press, San Diego, USA.
5. Drogoveyko, I. Z. (1981) *Razrusheniye merzlykh gruntov vzryvom* [Destruction of frozen soils by explosion], Nedra, Moscow, Russia.
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. Ershov, E. D. (2002) *Osnovy geokriologii* [General geocryology], MSU, Moscow, Russia.
8. 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.
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 tekhnologii hirnychoho vyrobnytstva*, no. 21, pp. 18–28.
10. Stepanova, L. V. (2009) *Matematicheskie metody mehaniki razrusheniya* [Mathematical methods of fracture mechanics], FIZMALIT, Moscow, Russia.

Стаття надійшла 14.05.2019.