

приконтурний ґрунтовий масив дозволяє встановити основні параметри процесу роликового формування геотехнічних властивостей приконтурного ґрунтового масиву тунелю з урахуванням реологічних властивостей бетонної суміші.

Використовуючи наведені спрощені моделі поведінки ґрунту (модель Гука і Бингама з зміцненням) при дії роликового робочого органу, можна вважати, що після проведення процесу формування геотехнічних властивостей прилеглого контуру, у випадку будівництва тунелю кругового обриса, ґрунтовий гірський масив буде розділено на зони з границями у вигляді концентричних кіл.

### Список використаних джерел

1. Korolov N.E., Kuzin V.N., Selivanova S.A. Formovanie zhelezobetonnyih izdeliy metodom rolikovogo pressovaniya // NIIZhB. M.: Stroyizdat, 1970. – vyip. 22. –S. 32–38.
2. Korolyov N.E. K vyboru stankov dlya massovogo proizvodstva betonnyih i zhelezobetonnyih trub // Beton i Zhelezobeton. 1973. – №3. – S. 9-10.
3. Kaluzhskiy Ya.A., Batrakov O.T. Uplotnenie zemlyanogo polotna i dorozhnyih odezhd. M.: Transport, 1970. – 160 s.
4. Harhuta N.Ya., Vasilev Yu.M. Ustoychivost i uplotnenie gruntov dorozhnyih nasyipey. M.: Avtotransizdat, 1964. – 216 s.
5. Mehanika kontaktnogo vzaimodeystviya : per. s angl. / K. Dzhonson ; pod red. R.V. Goldshteyna . – M. : Mir, 1989 . – 510s.

*Стаття надійшла до редакції 14.03.2014 р.*

УДК 624.39.329

**Н. С. Ремез, д. т. н., І. А. Іванова (НТУУ «КПІ»)**

### **ВЗАЄМОДІЯ СЕЙСМОВИБУХОВИХ ХВИЛЬ З ШАРУВАТИМ ГРУНТОВИМ МАСИВОМ І ПІДЗЕМНИМ ТРУБОПРОВОДОМ**

**N. S. Remez, doctor of technical sciences, I. A. Ivanova (NTUU «KPI»)**

### **INTERACTION OF SEISMIC BLAST WAVES WITH LAYERED SOIL MASSIF AND UNDERGROUND PIPE**

*Проведено математичне моделювання взаємодії сейсмовибухових хвиль з шаруватим ґрунтовим масивом і розташованим у ньому трубопроводом. Встановлені залежності основних параметрів коливань системи «ґрунт – трубопровід» для різних випадків розташування шарів ґрунту для забезпечення сейсмобезпеки охоронного об'єкта.*

**Ключові слова:** сейсмостійкість, вибух, трубопровід, об'ємна деформація, чисельне моделювання.

*Проведено математическое моделирование взаимодействия сейсмозрывных волн со слоистым грунтовым массивом и расположенным в нем трубопроводом. Установлены зависимости основных параметров колебаний системы «грунт – трубопровод» для различных случаев расположения слоев грунта для обеспечения сейсмобезопасности охраняемого объекта.*

**Ключевые слова:** сейсмостойкость, взрыв, трубопровод, объемная деформация, скорость колебаний, численное моделирование.

*Mathematical simulation of seismic explosive waves interaction with layered ground massif and pipe placed in it has been done. The dependences of basic parameters of oscillations of the system “ground – pipe” for different cases of ground layer dislocations was elaborated for providing the seismic stability of protected object.*

**Keywords:** seismic safety, explosion, pipe, volume deformation, numerical simulation.

**Вступ.** При розрахунку міцності трубопроводу враховуються такі навантаження і впливи: 1) навантаження і впливи, що виникають при спорудженні, випробуванні та експлуатації трубопроводу, які виражаються через поздовжні осеві напруження; 2) навантаження від впливу сейсмічних сил, які спрямовані уздовж поздовжньої осі трубопроводу. Ці сейсмічні сили, викликані землетрусами або вибуховими роботами. У даній роботі досліджується і враховуються сейсмічні дії, які можуть бути викликані масовими вибухами в кар'єрі при його експлуатації.

Ступінь пошкодження трубопроводу від дії сейсмічних хвиль залежить від цілого ряду чинників: сили сейсмічної дії і напрямку поширення сейсмічних хвиль, геологічних і гідрогеологічних умов експлуатаційно-технологічних навантажень і впливів, конструкції трубопроводу і його стиків, характеристик матеріалу труб, ступеня зношеності трубопроводу. Нерідкі випадки, коли старі трубопроводи виходять з ладу при дуже слабких сейсмічних діях і часто дуже важко встановити, що послужило причиною аварії - їх зношеність (корозійне пошкодження) або сейсмічна дія [1]. Останнє може бути тією «останньою краплею», яка прискорює настання аварії.

Ґрунти, що оточують підземні трубопроводи, є не тільки джерелом сейсмічної дії, а й беруть участь у коливальному процесі і деформуванні спільно з самим трубопроводом. Від властивостей ґрунту істотно залежить інтенсивність струсу і особливість розвитку коливального процесу в системі «трубопровід - ґрунт». Залежно від щільності і однорідності оточуючого трубопровід ґрунтового середовища, ступеня обводнення ґрунтів будуть різними інтенсивність прояву вибухів, спектральний склад сейсмічних коливань і механізм взаємодії трубопроводу з ґрунтовим середовищем. Якщо трубопровід, пов'язаний з ґрунтом, втягується в коливальний процес, то ґрунт передає зусилля трубопроводу з деяким проковзуванням.

Таким чином, відносні зміщення у ґрунтовому середовищі будуть більші, ніж відносні зміщення трубопроводу.

Сейсмічна хвиля, швидкість розповсюдження якої в трубопроводі більше, ніж у ґрунті, досягне по трубопроводу ділянок, ще не залучених у коливальний процес. На цих ділянках сам трубопровід буде генератором коливань, а ґрунт у даному випадку буде грати роль демпфуючої подушки. Генераторами коливань можуть бути також споруди або трубопроводи іншого напрямку, до яких підключено розглянутий трубопровід.

При розрахунках слід розглядати коливання системи «трубопровід - ґрунт», динамічні характеристики якої будуть відрізнятися від динамічних характеристик трубопроводу, умовно виділеного з ґрунтового середовища.

Таким чином, можливі дві схеми роботи підземного трубопроводу при поширенні сейсмічної хвилі уздовж його поздовжньої осі [2]: 1) трубопровід, занурений в ґрунт, залучений в коливальний процес; додаткові зусилля в трубопроводі викликаються напруженим станом ґрунтового середовища; 2) трубопровід, занурений у ґрунтове середовище, що перешкоджає коливальному процесу.

**Метою роботи** є дослідження впливу шаруватості ґрунтового масиву на сейсмостійкість підземного трубопроводу під дією вибухових хвиль.

**Викладення основного матеріалу.** Граничний стан магістрального підземного сталевих газопроводу буде характеризуватися нерівністю [3]

$$(\sigma_{np.N} + \sigma_{np.S}) \leq \psi_2 R_1, \text{ де:} \quad (1)$$

$\sigma_{np.N}$  - найбільші можливі напруження в трубопроводі від розрахункових експлуатаційних навантажень і впливів;  $\sigma_{np.S}$  - найбільше можливе напруження в трубопроводі від сейсмовибухових впливів;  $\psi_2$  - коефіцієнт враховує двоосний напружений стан металу труби, при розтягуючих осьових поздовжніх напруженнях, що відповідає значенню максимального позитивного температурного перепаду  $\Delta t_{(+)}$ , тобто умовам роботи розглянутого трубопроводу, що дорівнює одиниці;  $R_1$  - розрахунковий опір металу труби, що визначається за формулою:

$$R_1 = \frac{R_1^H \cdot m}{K_1 \cdot K_H}, \text{ де:} \quad (2)$$

$R_1^H$  - нормативний опір розтягування металу труби і зварних з'єднань;  $m$  - коефіцієнт умов роботи газопроводу;  $K_1$  - коефіцієнт надійності металу;  $K_H$  - коефіцієнт надійності за призначенням трубопроводу.

Поздовжні осьові напруження визначаються згідно розрахункових навантажень і впливів з урахуванням пружно-пластичної роботи металу при експлуатації газопроводу. Для підземних газопроводів при відсутності просідання і пучення ґрунту вони визначаються за формулою:

$$\sigma_{np.N} = -\alpha E \Delta t_{(+)} + \mu \frac{n \cdot p \cdot D_{вн.}}{2\delta_H}, \text{ де:} \quad (3)$$

$\alpha$  - коефіцієнт лінійного розширення металу труби,  $E$  - змінний параметр пружності, який визначається за формулою:

$$E = \frac{\sigma_i / \varepsilon_i}{1 + \frac{1 - 2\mu_0}{3E_0} \cdot \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}}, \text{ де:} \quad (4)$$

$\sigma_i$  - інтенсивність напружень, яке визначається через головні напруження

$$\sigma_i = \sigma = \sqrt{\sigma_{\kappa\kappa}^2 - \sigma_{np.N} \cdot \sigma_{\kappa\kappa} + \sigma_{np.N}^2}, \text{ де:} \quad (5)$$

$\sigma_{\kappa\kappa}$  - кільцеве напруження від розрахункового внутрішнього тиску, що визначається за формулою:

$$\sigma_{\varepsilon\delta} = \frac{n \cdot p \cdot D_{\text{вн}}}{2\delta_n}, \text{ де:} \quad (6)$$

$n$  - коефіцієнт надійності від навантаження внутрішнім робочим тиском в газопроводі;  $P$  - робочий (нормативний) тиск;  $D_{\text{вн}}$  - внутрішній діаметр труби;  $\delta_i$  - номінальна товщина стінки труби.

Інтенсивність деформацій визначається за інтенсивністю напружень відповідно до діаграми деформування, що розраховується за нормованої діаграми розтягування за формулою:

$$\varepsilon_i = \varepsilon - \frac{1 - 2\mu_0}{3E_0} \cdot \sigma_i, \text{ де:} \quad (7)$$

$\mu_0$  - коефіцієнт поперечної деформації в пружній області;  $E_0$  - модуль пружності.

Абсолютні значення максимального позитивного температурного перепаду визначаються за формулою:

$$\Delta t = \frac{\mu_0 \cdot R_1}{\alpha \cdot E_0}. \quad (8)$$

Змінний коефіцієнт поперечної деформації сталі обчислюється за виразом:

$$\mu = \left( \frac{1}{2} - \frac{1 - 2\mu_0}{3E_0} \right) / \left( 1 + \frac{1 - 2\mu_0}{3E_0} \cdot \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \right). \quad (9)$$

Зі збільшенням терміну експлуатації трубопроводу напруження в тілі труби через корозійне зменшення її жорсткості зростають [4].

Напруження в прямолінійних підземних магістральних газопроводах від дії сейсмічних сил, спрямованих уздовж поздовжньої осі газопроводу, визначаються за формулою:

$$\sigma_{np.} = \frac{\pm 0,04 m_0 K_0 \cdot K_{II} \cdot a_c \cdot E_0 \cdot T}{V_p}, \text{ де:} \quad (10)$$

$m_0$  - коефіцієнт защемлення газопроводу в ґрунті ( $m_0 = 0,45$ );  $K_0$  - коефіцієнт, що враховує відповідальність газопроводу ( $K_0 = 1,5$ );  $K_{II}$  - коефіцієнт повторюваності сейсмічної дії ( $K_{II} = 1,25$ );  $a_c$  - сейсмічне прискорення ґрунту, см/с<sup>2</sup>;  $E_0$  - модуль пружності металу;  $T$  - переважаючий

період сейсмічних коливань ґрунту;  $V_p$  - швидкість поширення об'ємної сейсмічної хвилі вздовж поздовжньої осі газопроводу.

В остаточному вигляді граничний стан магістрального підземного сталевих газопроводу ДККР характеризується нерівністю:

$$(\sigma_{np} \cdot N + \sigma_{np} \cdot S) < R_1. \quad (11)$$

Ґрунт моделюється твердим пористим багатокомпонентним в'язко – пластичним середовищем зі змінним коефіцієнтом в'язкості [5]:

$$\varepsilon = \varphi(P, \varepsilon) \dot{P} - \frac{\alpha_1 \lambda(P, \varepsilon)}{\eta(P, \varepsilon)} \psi(P, \varepsilon). \quad (12)$$

Змінні функції, що входять в рівняння (12) визначаються згідно з роботою [5].

За допомогою програмного пакету Ansys, було проведено моделювання ділянки ґрунтового середовища, в якому розміщений підземний газопровід на глибині 0,8 - 1,2 м. Ділянка ґрунтового масиву безпосередньо знаходиться під дією сейсмічного навантаження в результаті проведення буро - вибухових робіт на Кошіївському гранітному кар'єрі поблизу прокладення газопроводу.

Для моделювання було вибрано три шари ґрунту, фізико - механічні характеристики яких наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Фізико - механічні характеристики ґрунтів

№ з/п	Найменування	Потужність слою, м			Щільність, кг/м <sup>3</sup>	Модуль пружності, МПа	Коефіцієнт Пуассона	Модуль пружності другого роду, Па	Питома вага, Н/м <sup>3</sup>
		від	до	середня					
1	Родючий шар	0,8	1,6	1	1612	4	0,45	1379000	16600
2	Суглинок	0	3,9	1,3	1734	2,9	0,4	5362000	17200
3	Глина	0	8,8	4,2	1835	2	0,37	7413000	18000

Для подальшого проведення моделювання методом кінцевих елементів для розрахунку була побудована розрахункова сітка на 9635 елементів. Для проведення даного моделювання було використано два препроцесора Modalta RandomVibration.

Сейсмічне навантаження було задано за допомогою експериментально отриманої осцилограми при проведенні масового вибуху на Кошіївському гранітному кар'єрі (Київська обл.).

Для дослідження особливостей поведінки сейсмовибухових хвиль (СВХ) при поширення в ґрунтовому просторі в залежності від шаруватості ґрунту та його фізико-механічних характеристик було проведено чотири варіанта розрахунків для такого розташування шарів: 1) – глина; 2) суглинок; 3) два

верхніх шарі - родючий ґрунт різної щільності, нижній – суглинок; 4) родючий ґрунт – суглинок – глина.

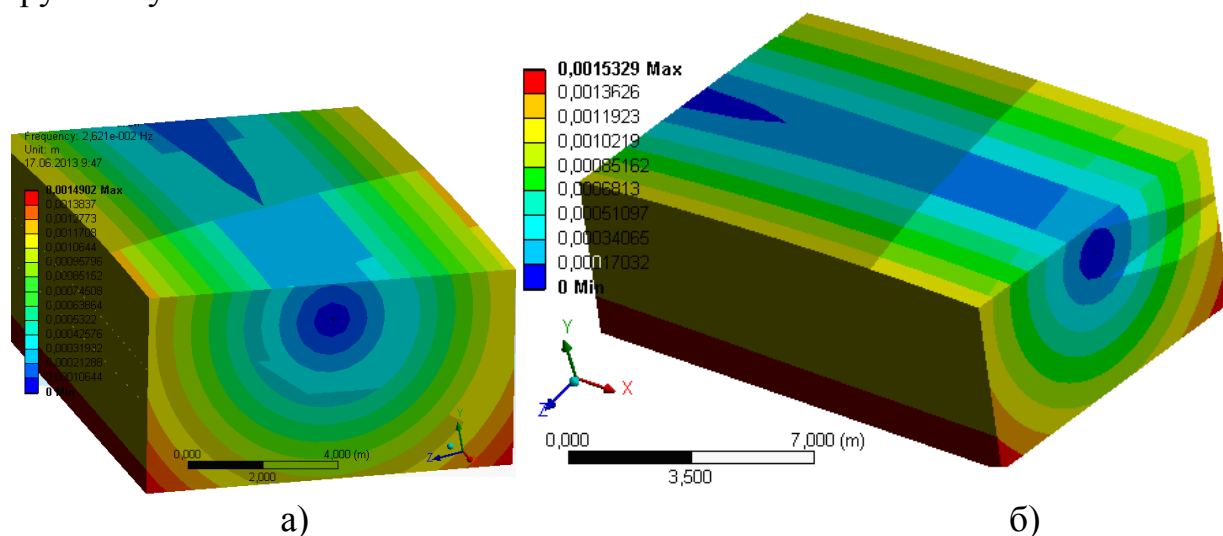
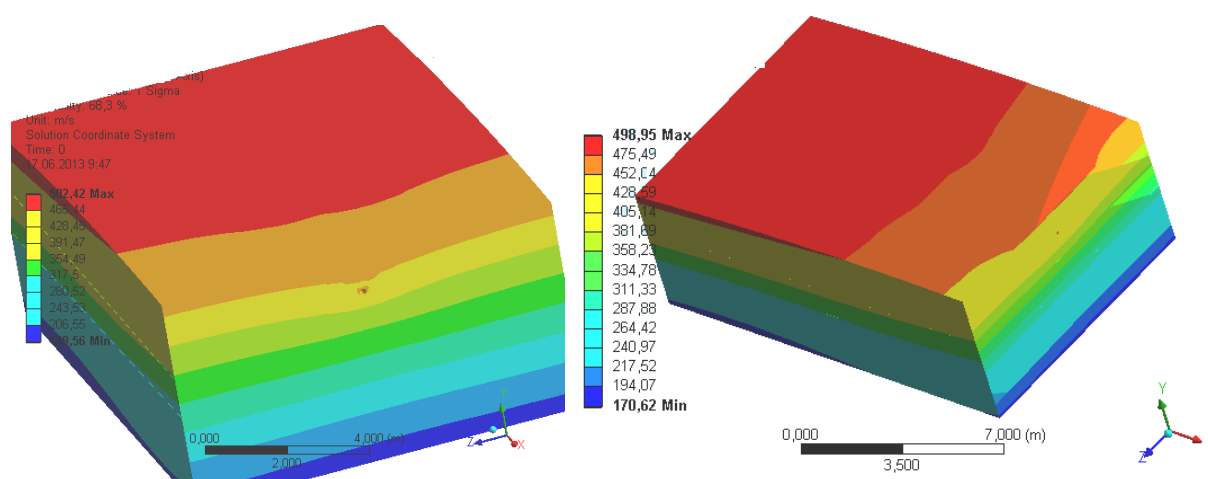


Рис. 1. Розподіл об'ємної деформацій навколо трубопроводу:

а – для глини; б – для родючого ґрунту, суглинка та глини. Крапкою відмічено положення трубопроводу

Аналізуючи результати розрахунків розподілу деформацій можна прийти до висновку, що найменша об'ємна деформація досягається в глині, а найбільша в родючому шарі ґрунту що знаходиться в прямо пропорційній залежності зі щільністю ґрунту, тобто чим більша щільність тим менше він стисливий.

Аналіз досліджень показав, що найбільша швидкість досягається на верхньому шарі, а мінімальна на нижньому підстилаючому шарі, що пояснюється взаємодією падаючої сейсмовибухової хвилі з зовнішньою вільною поверхнею. Для чотирьох розглянутих випадків найбільше значення швидкості зміщення спостерігається, коли однорідний ґрунтовий масив складається з глини, для суглинка ці значення на 13-15 % менші.





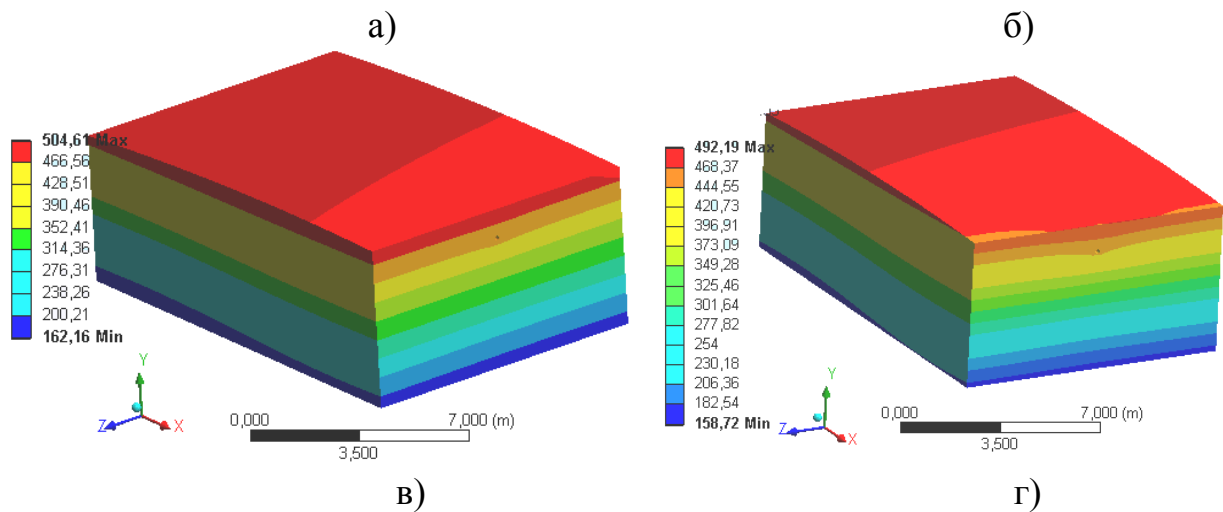


Рис. 2. Розподіл швидкості зміщення частинок ґрунту по осі Z:

а – для глини; б – для суглинку; в – для родючого шару ґрунту, суглинку та глини; г – родючого ґрунту та суглинку

Це пояснюється тим, що в більш щільних ґрунтах швидкість розповсюдження хвиль більша, ніж в пористих ґрунтах. Крім того, при переході хвилі з більш щільного ґрунту в менш щільний ґрунт відбувається зменшення її параметрів, в тому числі і швидкості зміщення часток ґрунту [5]. Це забезпечує сейсмостійкість при умові, якщо верхній шар ґрунту пористий, а підстилаюча поверхня більш щільна, що в реальності існує на Кошівському гранітному кар'єрі. Тому можна зробити висновок про сейсмостійкість трубопроводу.

### Висновки

1. На базі пакету прикладних програм ANSYS проведено моделювання процесу взаємодії СВХ з тонкою циліндричною оболонкою в шаруватому ґрунтовому середовищі та отримані власні коливання газопроводу.

2. Отримані закономірності зміни деформації, швидкості частинок для шаруватих ґрунтів навколо підземного газопроводу з урахуванням фізико-механічних властивостей ґрунту і матеріалу оболонки, а також її геометричних параметрів.

3. Встановлено, що найбільш сейсмонебезпечним є таке розташування шарів ґрунту, коли верхній шар має більшу акустичну жорсткість (глина), а найбільш безпечним є таке розташування шарів, якщо верхній шар ґрунту пористий, а підстилаюча поверхня більш щільна.

---

**Список використаних джерел**

1. Allard P. Mesures sismiques dans L'environeet des tirs / Allard P. // Mines et carriers. – 2002. – 84, mars, pp. 49-5.
2. Shemjakin E.I. O volnah naprjazhenij v prochnyh gornyh porodah / E.I. Shemjakin // PMTF. – 1963. - № 3. – S. 83- 93.
3. Borovikov V.A. K raschetu parametrov volny naprjazhenija pri vzryve udlinennogo zarjada v gornyh porodah / V.A. Borovikov, I.V. Vanjagin // Vzryv. delo. - № 76/33. - M.: Nedra, 1976. – С. 74–85.
4. Kravec V.G. Dinamika uplotnenija gruntovogo massiva vzryvom / V. G. Kravec. – Kiev: Nauk. dumka, 1979. – 134 s.
5. Mehanicheskij effekt vzryva v gruntah / Luchko I.A., Plaksij V.A., Remez N.S. i dr. – Kiev: Nauk. dumka, 1989. – 232 s.

*Стаття надійшла до редакції 21.03.2014 р.*

УДК 622.235.5+550.36

**А. М. Самедов, д. т. н, професор (НТУУ «КПІ»), В. Г. Кравець, д. т. н., професор (НТУУ «КПІ»), О. А. Новохацький, асп. (НТУУ «КПІ»)**

---

**ТЕРМОДИНАМІЧНА АКТИВАЦІЯ ПІДЗЕМНОГО ВОДНОГО РОЗЧИНУ І ФАЗОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ В ГІРСЬКИХ ПОРОДАХ ПРИ ВИБУХУ**

---

**A. M. Samedov, Ph.D., prof. (NTUU «KPI»), V. G. Kravets, Ph.D., prof. (NTUU «KPI»), O. A. Novokhatskyi, postgraduate student (NTUU «KPI»)**

**THERMODYNAMIC ACTIVATION OF UNDERGROUND WATER SOLUTION AND PHASE TRANSFORMATION IN THE BLASTED ROCK**

*У статті розглянуто проблеми термодинамічної активації водного розчину і фазових перетворень гірських порід у результаті впливу температури підземного вибуху. Встановлено, що температура вибуху прискорює розчинення солей і цементуючих речовин, що знаходяться у складі гірських порід. Температура і тиск змінюють модифікації деяких породоутворюючих мінералів та активують фазові перетворення з отриманням нових хімічних сполук.*

**Ключові слова:** *гірські породи, підземний вибух, енергія вибуху, породоутворюючі мінерали, фазові перетворення гірських порід.*

*В статье рассмотрены проблемы термодинамической активации водного раствора и фазовых превращений горных пород в результате воздействия температуры подземного взрыва. Установлено, что температура взрыва ускоряет растворение солей и цементирующих веществ, находящихся в составе горных пород. Температура и давление изменяют модификации некоторых породообразующих минералов, активируя фазовые превращения с получением новых химических соединений.*

**Ключевые слова:** *горные породы, подземный взрыв, энергия взрыва, породообразующие минералы, фазовые превращения горных пород.*