

**В.Г. Кравець, д.т.н., проф.**

*Національний технічний університет України «КПІ»*

**В.Ф. Мейш, д.ф.-м.н., проф.**

*Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України*

**Л.В. Шайдецька, к.т.н.**

*Національний технічний університет України «КПІ»*

## **РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ПРО ВЗАЄМОДІЮ ЦИЛІНДРИЧНИХ ХВИЛЬ ІЗ ЖОРСТКОЮ ПЕРЕПОНОЮ В ДВОШАРОВОМУ ҐРУНТОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ**

*Для розвитку геотехнічного будівництва в складних гідрогеологічних умовах важливі не лише якість, надійність та економічність, але і швидкість спорудження об'єктів, що є важливим фактором при виборі способу та технології будівництва. Застосування енергії вибуху особливо ефективно при влаштуванні вертикальних захисних споруд мілко закладання в структурно-нестійких ґрунтах.*

*Розглядається задача про взаємодію циліндричних хвиль в ґрунтовому середовищі з абсолютно жорсткою перегородкою для встановлення механізму розвитку неруйнуючих полів напружень від вибуху подовженого заряду. Ґрунт моделюється рівняннями нелінійного трикомпонентного багатощарового середовища поблизу жорстких конструкцій підземних споруд. Для чисельного розв'язання зв'язаної задачі «двошарове ґрунтове середовище–жорстка перегородка» про поширення циліндричних хвиль в ґрунтовому середовищі, використовується скінчено-різницєва схема Мак–Кормака. Отримані чисельні результати дозволяють аналізувати хвильові процеси в системі залежно від параметрів ґрунтового середовища. Встановлено закономірності взаємодії вибухового імпульсу в двошаровому середовищі з жорсткою перегородкою, що дозволяють узгодити хвилі тиску в ґрунті з міцнісними параметрами жорсткої перегородки з урахуванням типу і параметрів заряду вибухової речовини.*

**Ключові слова:** *трикомпонентне ґрунтове середовище; хвильові процеси; чисельні методи; жорстка перегородка.*

**Постановка проблеми.** Будівництво підземних споруд пов'язане зі змінами існуючого напружено-деформованого стану ґрунтів, за яких можуть виникати безповоротні порушення в масиві. В зв'язку з цим, на особливу увагу заслуговує подальше вдосконалення проектування та будівництва заглиблених споруд та підземних частин будівель, що мають вагу у загальному об'ємі будівельних робіт.

Більшість заглиблених об'єктів споруджуються у відкритих котлованах навіть в місцях щільної міської забудови. В таких умовах часто застосовують опускні колодязі та спосіб “стіна в ґрунті”. При способі “стіна в ґрунті” підземні опірні стіни споруджуються в траншеях під глинястою суспензією, яка заповнює їх під час спорудження та попереджає обрушення стінок траншеї. Але навіть при перевагах цього над іншими він має свої недоліки. Щоб покращити технологію будівництва методом “стіна в ґрунті” і зменшити час спорудження, потрібно запропонувати такі методи робіт, які б не мали обмежень по довжині траншеї і в яких можна сумістити вже відомі методи: швидке утворення траншеї потрібної ширини за допомогою енергії вибуху та розміщення в утвореній траншеї збірних панелей або заповнення їх бетонним розчином.

Погіршення гідрогеологічних умов та підвищене техногенне навантаження на території міської забудови припускають необхідність спеціальних способів закріплення ґрунтових основ. У зв'язку з цим, на особливу увагу заслуговує подальше вдосконалення проектування та будівництва будівель та споруд в ґрунтах зі складними інженерно-геологічними умовами, яке передбачає надання таким ґрунтам достатньої несучої спроможності шляхом їх армування та підсилення цієї спроможності, збільшення надійності експлуатації будівель і споруд в умовах оточуючих слабких ґрунтових масивів періодичної структури при формуванні стінок глибоких траншей, поблизу раніше споруджених елементів, з залученням закріплюючих розчинів, оброблених енергією вибуху.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанням взаємодії деформаційних хвиль із жорсткими перегородками в ґрунтових середовищах присвячено значну кількість робіт [1–5, 7, 8, 13–17]. Закономірності перебігу хвильових процесів в ґрунтових середовищах за наявності різних перешкод дозволяють прогнозувати їх динамічну поведінку в широкому діапазоні зміни фізико-механічних властивостей ґрунтів.

**Метою даної роботи** є визначення залежностей параметрів вхідних хвиль тиску в ґрунт залежно від геометрії та фізико-механічних властивостей ґрунтового середовища, можливість їх регулювання в двошаровому ґрунтовому середовищі з абсолютно жорсткою перегородкою при дії вибухового навантаження.

**Викладення основного матеріалу досліджень.** В постановці завдання розглянуто трикомпонентне ґрунтове середовище, в якому розміщено свердловину з тампонажним розчином та розташованим по її осі подовженим зарядом. Враховуючи труднощі розв'язання математичної задачі вибуху вісесиметричного заряду поблизу жорсткої плоскої поверхні, заряд умовно поділено на 2 паралельні частини, що розташовані в площині, паралельній площині жорсткої перепони. Передбачається, що після вибуху спарених циліндричних зарядів в ґрунті утвориться порожнина еліптичного перерізу, де довга вісь еліпса також паралельна площині перепони.

Передбачається, що до внутрішньої поверхні при  $r = r_0$  прикладене розподілене імпульсне навантаження  $P_3(t)$  (рис. 1).

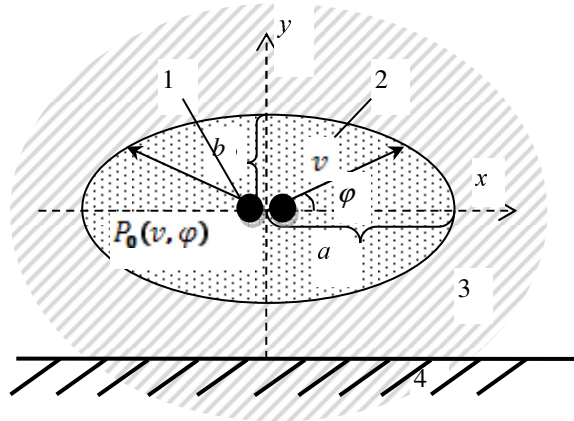


Рис. 1. Схема вибуху в середовищі періодичної структури:  
1 – заряд; 2 – тампонуєчий розчин; 3 – ґрунт; 4 – жорстка перепона

Таким чином, в подальшому розглядається плоска задача про розповсюдження вибухових хвиль в ґрунтовому середовищі в узагальненій полярній системі координат. Рівняння лінійної поверхні в узагальненій системі координат задається в параметричній формі:

$$\begin{aligned}x &= av \cos \varphi; \\y &= bv \cos \varphi,\end{aligned}$$

де  $a, b$  – півосі еліптичного перерізу;  $v, \varphi$  – координати поверхні.

Згідно з теорією Кільчевського, Васідзу, побудовано неортогональну криволінійну систему координат.

У випадку  $a = b$  маємо звичайну полярну систему координат  $(v, \varphi)$  на  $S$ , яка є ортогональною.

Для опису поведінки шарів ґрунтового середовища використовується модель нелінійного рідкого багатокомпонентного середовища відповідно до [7, 8]. Рівняння стану даної моделі записують у вигляді:

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \sum_{i=1}^3 \alpha_i \left[ \frac{\gamma_i (P - P_0)}{\rho_{i0} c_{i0}^2} + 1 \right]^{-\chi_i} \quad (1)$$

де  $\chi_i = 1/\gamma_i$ ,  $\gamma_i$  – показник ізентропи  $i$ -ої компоненти.

Для рівняння стану трикомпонентного середовища (водонасиченого ґрунту) (1) вводяться наступні позначення:  $\alpha_i$  – склад за об'ємом компонент;  $\rho_{i0}$  – щільність;  $V_{i0}$  – їх питомий об'єм;  $c_{i0}$  – швидкість звуку в компонентах при атмосферному тиску  $P_0$ ;  $i$  – номер компоненти (1 – повітря, 2 – рідина, 3 – тверді частинки).

При тискові  $P = P_0$  щільність середовища  $\rho_0$  і питомий об'єм  $V_0$  визначаються за формулами:

$$\rho_0 = \frac{1}{V_0} = \sum_{i=1}^3 \alpha_i \rho_{i0}, \quad \sum_{i=1}^3 \alpha_i = 1.$$

Характеристики кожного шару визначаються відповідними величинами  $\alpha_i$ ,  $\rho_{i0}$ .

Рух двошарового ґрунтового середовища для випадку розповсюдження циліндричних хвиль описується системою рівнянь в ейлеревих координатах [9]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r(\rho U^2 + P)] - \frac{1}{r} P = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r(\rho U)] = 0$$

де  $r$  – просторова координата;  $t$  – координата часу;  $U$  – швидкість;  $\rho$  – щільність;  $P$  – тиск.

Рівняння руху ґрунтового середовища (2) доповнюються рівнянням стану (10) виду  $F(P, \rho) = 0$ , де

$$F(P, \rho) = \sum_{i=1}^3 \alpha_i \left[ \frac{\gamma_i (P - P_0)}{\rho_{i0} c_{i0}^2} + 1 \right]^{-1/\gamma_i} - \frac{\rho_0}{\rho}. \quad (3)$$

Як граничні умови для задачі динаміки ґрунтового середовища приймаються рівняння (2), (3) при  $r = r_0$  та умову рівності нулю швидкості на жорсткій перепоні при  $r = r_N$ . На межі контакту ґрунтів із різними щільностями задаються умови неперервності швидкості.

**Чисельний алгоритм розв'язання задачі.** Алгоритм розв'язання задачі про поширення циліндричних хвиль в ґрунтовому середовищі (2)–(3) базується на застосуванні кінцево-різницевої схеми Мак–Кормака [4, 10].

На кроці предиктор різнищеві рівняння мають вигляд:

$$\begin{aligned} \tilde{\rho}_k &= \rho_k^n - \frac{\tau}{r_k} \left[ \frac{(r\rho^n V^n)_{k+1} - (r\rho^n V^n)_k}{\Delta r} \right], \\ (\tilde{\rho}\tilde{V})_k &= (\rho^n V^n)_k - \frac{\tau}{r_k} \left\{ \frac{[r(\rho V^2 + P)^n]_{k+1} - [r(\rho V^2 + P)^n]_k}{\Delta r} - P_k^n \right\} \\ F(\tilde{P}_k, \tilde{\rho}_k) &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

На кроці коректор рівняння записуються таким чином:

$$\begin{aligned} \rho_k^{n+1} &= 0,5 \left\{ \rho_k^n + \tilde{\rho}_k - \frac{\tau}{r_k} \left[ \frac{(r\tilde{\rho}\tilde{V})_k - (r\tilde{\rho}\tilde{V})_{k-1}}{\Delta r} \right] \right\} \\ (\rho V)_k^{n+1} &= 0,5 \left\{ (\rho^n V^n)_k + (\tilde{\rho}\tilde{V})_k - \right. \\ &\left. - \frac{\tau}{r_k} \left[ \frac{[r(\tilde{\rho}\tilde{V}^2 + \tilde{P})]_k - [r(\tilde{\rho}\tilde{V}^2 + \tilde{P})]_{k-1}}{\Delta r} - \tilde{P}_k \right] \right\} F(P_k^{n+1}, \rho_k^{n+1}) = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Для знаходження значення тиску  $P$  за заданими значеннями щільності  $\rho$  у (4) використовується ітераційна процедура Ньютона–Рафсона.

Враховуючи, що різнищеві схема Мак–Кормака (4), (5) є явною, при розрахунках використовується умова стійкості:  $(|V| + c)\tau/\Delta r < 1$ , де величина  $c$  відповідає локальній швидкості звуку [7, 8, 10].

**Приклад розрахунку.** Розглядається задача про вибух циліндричного заряду у двошаровому ґрунтовому середовищі. Передбачається, що в результаті вибуху циліндричного заряду (теповий детонує шнур з характеристиками: вага ВР –  $15 \cdot 10^{-3}$  кг/м) в першому шарі до утвореної циліндричної порожнини радіуса  $r = r_0$  прикладене навантаження  $P_3(t)$ , що характеризується залежністю:

$$P_3(t) = A \sin \frac{\pi t}{T} [\eta(t) - \eta(t - T)],$$

де  $\eta(t)$  – функція Хевісайда.

Параметри  $A$  та  $T$  обиралися, виходячи з експериментальних залежностей для ударної хвилі при підводному вибуху шнурового заряду [11].

Перший шар ґрунтового середовища при  $r_0 \leq r \leq 5r_0$  характеризується такими параметрами:  $\alpha_1 = 0$ ;  $\alpha_2 = 1,0$ ;  $\alpha_3 = 0$ . Для другого шару при  $5r_0 \leq r \leq 21r_0$  передбачається:  $\alpha_1 = 0$ ;  $\alpha_2 = 0,3$ ;  $\alpha_3 = 0,7$ . Для параметрів першого шару в (2) задавалося  $\rho_2 = 1,2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $\gamma_2 = 7$ . Для параметрів другого шару –  $\rho_2 = 1,2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $\gamma_2 = 7$ ;  $\rho_3 = 2,65 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $\gamma_3 = 4$ .

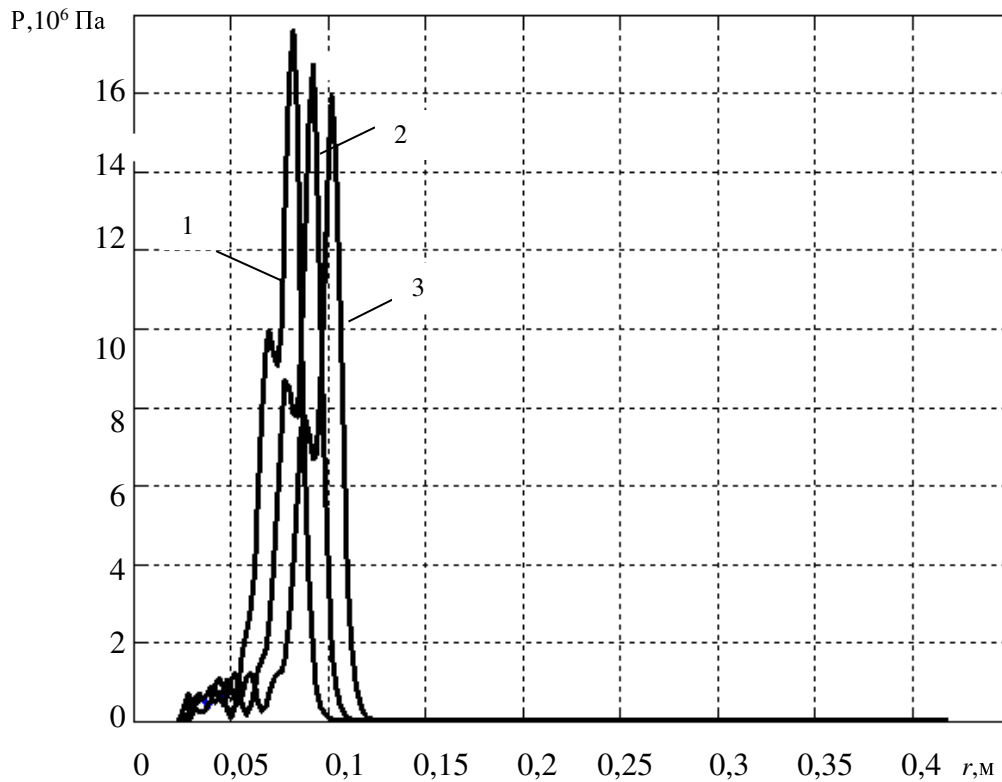


Рис. 1. Розвиток тиску  $P$  залежно від просторової координати  $r$  при переході межі середовищ

На рисунку 2 наведено залежності хвилі тиску  $P$  від просторової координати  $r$  при проходженні межі поділу середовищ  $r = 5r_0$ . Крива 1 відповідає часу  $t = 2,081T$ ; крива 2 – часу  $t = 2,381T$ , крива 3 –  $t = 2,681T$ . Осциляції на задньому фронті хвилі пояснюються ефектом відображення при проходженні хвилі з менш щільного середовища в більш щільне.

На рисунку 3 наведено моменти часу взаємодії хвилі із жорсткою перепорою при  $r = 21r_0$ . Крива 1 ( $t = 10,429T$ ) відповідає часу підходу хвилі до жорсткої перепони. Крива 2 ( $t = 11T$ ) – тиск на перепоні. Крива 3 ( $t = 11,333T$ ) – відбита хвиля.

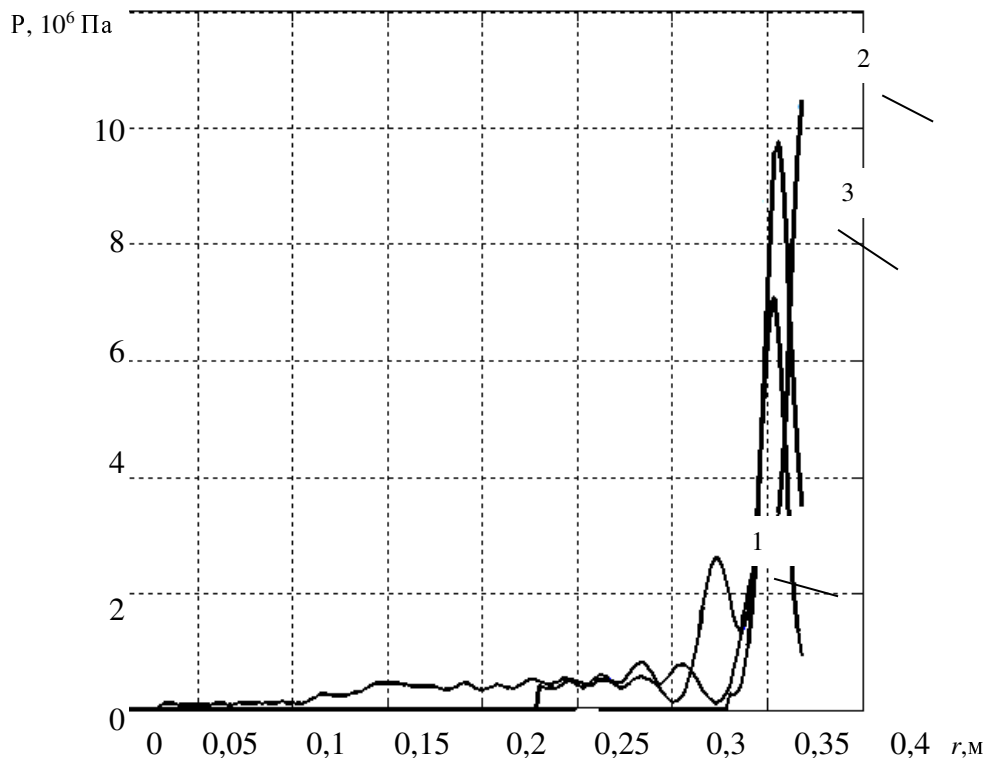


Рис. 2. Розвиток тиску  $P$  залежно від просторової координати  $r$  при взаємодії з жорсткою перегородкою

**Висновки.** Результати чисельного розв'язання зв'язаної задачі двошарового ґрунтового середовища – жорсткої перегородки при дії вибухового навантаження – дають можливість регулювати параметри вхідних хвиль тиску в ґрунт залежно від геометрії та фізико-механічних властивостей ґрунтового середовища. Отримані числові результати дозволяють прогнозувати хвильові процеси в неоднорідному ґрунтовому середовищі при проходженні хвиль через контактну межу шарів ґрунту залежно від їх параметрів.

#### Список використаної літератури:

1. Численное решение двумерных нестационарных задач взаимодействия тонкостенных конструкций с ґрунтовыми средами / В.Г. Баженов, А.В. Кочетков, С.В. Крылов, В.Р. Фельдгун // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Методы решения задач упругости и пластичности. – Горький : Горьковский ун-т, 1984. – С. 52–59.
2. Кочетков А.В. Нестационарное взаимодействие тонкостенных конструкций с ударными волнами в ґрунтовых средах / А.В. Кочетков, С.В. Крылов, В.Р. Фельдгун // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Методы решения задач упругости и пластичности. – Горький : Горьковский ун-т, 1985. – С. 60–65.
3. Баженов В.Г. Деформирование цилиндрических оболочек в мягкой ґрунтовой среде под действием внутреннего импульсного нагружения / В.Г. Баженов, А.В. Кочетков, В.Р. Фельдгун // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Методы решения задач упругости и пластичности. – Горький : Горьковский ун-т, 1989. – С. 87–95.
4. Головки К.Г. Динамика неоднородных оболочек при нестационарных нагрузках: монографія / К.Г. Головки, П.З. Луговой, В.Ф. Мейш ; под ред. акад НАН України А.Н. Гузя. – К. : Изд. полигр. центр «Киевский ун-т», 2012. – 541 с.
5. Луговой П.З. До розв'язку динамічних задач теорії оболонок в ґрунтовому середовищі при імпульсних навантаженнях / П.З. Луговой, В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш // Проблеми обчислювальної механіки та міцності конструкцій. – Дніпропетровський нац ун-т, 2010. – Вип. 14. – С. 230–238.
6. Луговой П.З. Волновые процессы в подкрепленных цилиндрических оболочках на упругом основании при импульсных нагрузках / П.З. Луговой, В.Ф. Мейш, К.Г. Головки // Вісник НТУУ «КПІ» / Серія «Гірництво» : зб. наук. праць. – К. : НТУУ «КПІ», 2006. – Вип. 14. – С. 31–37.
7. Ляхов В.М. Волны в ґрунтах и пористых многокомпонентных средах / В.М. Ляхов. – М. : Недра, 1982. – 288 с.

8. Механический эффект взрыва в грунтах / И.А. Лучко, В.А. Плаксий, Н.С. Ремез и др. – К. : Наук. думка, 1989. – 232 с.
9. Рождественский Б.Л. Системы квазилинейных уравнений и их приложение к газовой динамике / Б.Л. Рождественский, Н.И. Яненко. – М. : Наука, 1978. – 688 с.
10. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. Т. 2. / К.Флетчер. – М. : Мир, 1991. – 526 с.
11. Христофоров Б.Д. Параметры ударной волны при подводном взрыве шнурового заряда / Б.Д. Христофоров, Э.А. Широкова // ПМТФ. – № 5. – 1962. – С. 147–149.
12. Кравец В.Г. Динамика уплотнения грунтового массива взрывом / В.Г. Кравец. – К. : Наук. думка, 1979. – 134 с.
13. Кравец В.Г. Фізичні процеси прикладної геодинаміки вибуху : монографія / В.Г. Кравець, В.В. Коробійчук, В.В. Бойко. – Житомир : ЖДТУ, 2015. – 408 с.
14. Закусило Р.В. Засоби ініціювання промислових зарядів вибухових речовин : монографія / Р.В. Закусило, В.Г. Кравець, В.В. Коробійчук. – Житомир : ЖДТУ, 2011. – 212 с.
15. Криворучко А.О. Розробка узагальненої методики геометризації масивів природного каменю з метою отримання комплексної моделі родовища / А.О. Криворучко, В.В. Коробійчук, С.С. Іськов // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – 2012. – № 4 (63). – С. 190–202,
16. Коробійчук В.В. Оцінка результатів дослідження залежності параметрів пружних хвиль від тиску в зразках природного декоративного каменю / В.В. Коробійчук // Вісник Нац. техн. ун-ту України “КПІ” / Серія “Гірництво” : зб. наук. пр. – К. : НТУУ “КПІ” : ЗАТ “Техновібух”, 2012. – Вип. 22. – С. 101–105
17. Коробійчук В.В. Принципи інтерпретації ультразвукових вимірювань в напруженому масиві / В.В. Коробійчук // Вісник Нац. ун-ту водного господарства та природокористування / Технічні науки. – 2011. – № 4 (56). – С. 167–173

КРАВЕЦЬ Віктор Георгійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри геобудівництва та гірничих технологій Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «КПІ».

Наукові інтереси:

- геомеханіка та гірнича механіка;
- вибухові роботи.

МЕЙШ Володимир Федорович – доктор фізико-математичних наук, головний науковий співробітник Інституту механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України.

Наукові інтереси:

- механіка деформованого твердого тіла;
- неklasичні моделі теорії неоднорідних оболонкових структур;
- чисельні методи розв'язку динамічних задач теорії оболонок і пластин.

ШАЙДЕЦЬКА Любов Валентинівна – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри геобудівництва та гірничих технологій Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «КПІ».

Наукові інтереси:

- геомеханіка та гірнича механіка;
- геобудівництво.

E-mail: [Shaydetskaya\\_lubov@ukr.net](mailto:Shaydetskaya_lubov@ukr.net)

Стаття надійшла до редакції 06.11.2015