

А.М. Махно, аспір.
М.П. Стенюк, асист.
О.В. Камських, ст. викл.

Житомирський державний технологічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ РОЗПОДІЛУ НАПРУЖЕНЬ І ВЛАСТИВОСТЕЙ РОЗКРИТТЯ ТРІЩИНИ ПРИ КЛАСИЧНІЙ СХЕМІ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ГІДРАВЛІЧНИМ СПОСОБОМ МЕТОДОМ КІНЦЕВО-ЕЛЕМЕНТНОГО АНАЛІЗУ

(Представлено д.геол.н., проф. В.Т. Підвисоцьким)

Побудовано комп'ютерну модель процесу утворення вертикальної тріщини в гірській породі при використанні гідравлічного способу руйнування каменю. Досліджено етапи росту тріщин у породі та перерозподіл навантажень. Одержано залежності між напруженнями, тиском рідини на стінки гірської породи та швидкістю росту тріщини руйнування.

Постановка проблеми. Природні облицювальні камені широко використовуються в різних галузях народного господарства: архітектура, будівництво, техніка, художня каменеобробка. Розвиток й освоєння нових методів видобутку й обробки природного облицювального каменю дали можливість значно розширити області його використання й зменшити собівартість виробництва. Найбільш актуальною необхідністю галузі є збільшення обсягу виробництва полірованих виробів з каменю, в основному за рахунок раціонального видобутку й використання блоків правильної форми. Збільшення обсягу видобутку блоків можливе за рахунок поліпшення технології видобування блоків із масиву з використанням сучасних, менш трудомістких і матеріалоемних невибухових методів, що дають можливість покращити техніко-економічні показники виробництва. Головною умовою успішного застосування невибухових методів направленої відколу каменю є вивченість процесу тріщиноутворення. Одним із методів вивчення цього процесу є моделювання об'єктів та елементів масиву гірської породи і пов'язаних з ними процесів методом кінцевих елементів. Важливою причиною, чому цей метод варто застосовувати, полягає у його наочності, а також дуже малій вартості, порівняно з методами лабораторних досліджень. Бувають також випадки, коли даний метод є майже єдиним можливим методом експериментального вивчення і розв'язання практичних гірничих задач. В даний час при розколюванні монолітів з облицювального каменю на товарні блоки, найбільше поширення набувають невибухові способи статичної дії, що не спричиняють у масиві утворення мікротріщин, на відміну від вибухових методів динамічної взаємодії. Однак майже відсутня наукова база для описання процесу невибухового розколу монолітів з облицювального каменю. Метод комп'ютерного моделювання для дослідження цього процесу дозволить вивчити та встановити закономірності перебігу процесів росту тріщини і розколювання.

Аналіз дослідження та публікацій. Комп'ютерне моделювання процесів механіки гірських порід виходить на новий рівень розвитку, насамперед це пов'язано зі створенням комп'ютерів здатних обробляти велику кількість оперативної інформації.

Деяко подібні дослідження мали місце раніше, але для умов підземної розробки корисних копалин професором А.Н. Шашенко розроблено методуку та комп'ютерну модель, на якій проведено дослідження міцності гірських порід в об'ємному напруженому стані в умовах об'ємного стиску [1].

Попередніми дослідженнями Р.П. Дідика, Е.В. Кузнецова, В.Н. Забари встановлено [2], що швидкість росту тріщини при гідравлічному способі розколу каменю залежить від швидкості нагнітання рідини. Це означає, що рідина проникає у тріщину і розкриває її за допомогою внутрішнього тиску, що створюється всередині тріщини. У попередніх дослідженнях різними вченими проводилися випробування нагнітання рідини гідравлічним способом у свердловини в гранітних породах. Випробування показали, що тріщини були не повністю закриті із зазором від 6 до 15 мкм поблизу свердловини та від 3 до 5 мкм далі від свердловини. У дослідженні також зазначено, що породи, в яких утворювалися тріщини мали однакові властивості при розтязті тріщини, індукованої від свердловини, з нормальною жорсткістю 2000 ГПа/м або меншою. У даному дослідженні, невизначеними залишаються причини неповного розкриття тріщини, при втраті тиску для відкриття тріщини, що є досить важливим питанням, яке потрібно в подальшому більш детально вивчити.

Постановка задач досліджень. Виходячи з наведеного вище, постає необхідність у розробці методуку комп'ютерного моделювання процесу руйнування гірських порід з облицювального каменю гідравлічним методом, який найбільш точно відображає суть невибухового способу напрямленого розколу; визначенні найбільш ефективної моделі для застосування в процесі відколу моноліту при видобуванні облицювального каменю невибуховими методами; встановленні залежностей між

напруженням, тиском рідини на стінки гірської породи та швидкістю росту тріщини руйнування; здійсненні порівняльного аналізу отриманих результатів досліджень із опублікованими аналітичними й експериментальними даними для встановлення придатності застосування комп'ютерного моделювання при оцінці міцності гірських порід.

Викладення основного матеріалу дослідження. При класичному способі руйнування гірських порід гідравлічним способом для створення найбільш раціонального розколу, з найменшими витратами сировини, досить важливо визначити закономірність, за якою змінюються поля напружень навколо свердловини. Суть гідравлічного способу розколу монолітів з облицювального каменю полягає у тому, що у вертикальну свердловину під достатньо високим тиском нагнітають рідину, при цьому сама ж свердловина герметизується, що не дає можливості її вільному витоку зі свердловини. Внаслідок цього весь тиск рідини спрямований на стінки свердловини, що призводить до утворення тріщини, яка поступово починає збільшуватись і врешті-решт руйнує весь моноліт з облицювального каменю, розділяючи його на окремі блоки. При натуральних дослідженнях вимірювання напружень здійснюється від початку нагнітання води при постійній швидкості нагнітання і до повного розкриття тріщини. Під час нагнітання тиск збільшується лінійно з часом, до того часу, поки тріщина “закрита”, а згодом починає формуватися так званий “клин” розриву і тиск стабілізується [1]. Далі тиск починає знижуватись через втрату води в тріщині. Тиск у той момент, коли крива його залежності від часу відхиляється від лінійної залежності є критичним тиском, або тиском, за якого утворюється вертикальний розлом або тріщина. Дане дослідження включає в себе встановлення залежності між напруженням, тиском рідини на стінки гірської породи та швидкістю росту тріщини руйнування. Результати процесу моделювання показують зміну полів напружень навколо свердловини в часі. Мінімальне дотичне напруження на перетині тріщини та свердловини виявляється меншим за допустиме для лінійних пружних, ізотропних і однорідних середовищ. Під час нагнітання, рідина проникає в тріщину, що відкривається поступово в залежності від значення ефективного нормального напруження. Процес росту тріщини моделюється в двовимірній системі в горизонтальній площині (рис. 1). Модель складається з 1200 кінцевих елементів, свердловина діаметром 76 мм в діаметрі при геометричному розмірі моделі рівному 7 на 7 метрів.

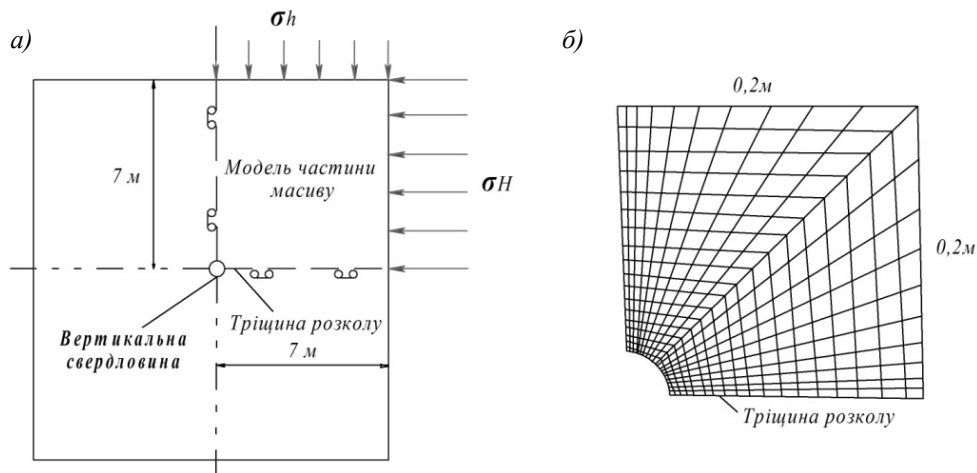


Рис. 1. Модель блоку гірських порід складена з кінцевих елементів: а – вигляд механічної моделі; б – детальне зображення кінцево-елементної сітки моделі поблизу свердловини в горизонтальному перерізі (права верхня чвертьна моделі)

Дослідження показує, що швидкість росту тріщини і нормальна жорсткість є дуже важливими факторами, які слід враховувати для визначення максимального головного напруження. Мінімальне значення головного напруження σ_h визначається вже після припинення процесу нагнітання тиску.

Максимальне значення головного напруження σ_h може бути отримане з класичного рівняння:

$$\sigma_i = 3\sigma_h - D_{2b} - D_0, \tag{1}$$

де P_{2b} – тиск початку утворення тріщини і P_0 – початковий тиск на стінки тріщини. Це рівняння справедливе для круглого перерізу, що піддається внутрішньому тиску в ізотропному, однорідному і лінійно-пружному середовищі. Вважають, що тиск при якому починає утворюватися тріщина, достатній, щоб створити мінімальні дотичні напруження на стінки свердловини:

$$\sigma_\theta^{\min} = 3\sigma_h - \sigma_h. \tag{2}$$

Моделювання процесу росту тріщини при гідравлічному способі руйнування гірських порід здійснено з використанням методу кінцевих елементів і програмного комплексу FLAC-3D [5]. За допомогою даної програми було створено спочатку геометричну модель системи, а потім цій моделі задано всі параметри. Залежність тиску рідини і механічних деформацій, що виникають при цьому, ґрунтується на використанні узагальненого закону створення нормального напруження.

Властивості гірської породи, що відповідають властивостям не вивіреного граніту наведено в таблиці 1. Руйнування моделюється на основі залежності нелінійного нормального напруження, порівняно з деформацією [3]. У цьому дослідженні механічний зазор σ'_n тріщини визначається при ефективному значенні нормального напруження, σ'_n :

$$\sigma'_i = \frac{A_i}{b_m}, \tag{3}$$

де A_i – постійна, що визначається за формулою:

$$A_i = \sigma'_{ii} \cdot b_{mi}, \tag{4}$$

де σ'_{ii} і b_{mi} – ефективне нормальне напруження і механічний зазор відповідно. Ефективні напруження в тріщині залежать від загальних напружень σ_n і тиску рідини p , та визначаються як:

$$\sigma'_n = \sigma_n - \alpha \cdot p. \tag{5}$$

Базове дослідження процесу росту тріщини гідравлічним способом руйнування гірських порід відбувається шляхом нагнітання води з постійною швидкістю 3 л/хв. У простір, шой має об'єм $S_w = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

Таблиця 1

Початкові дані моделювання

Характеристика	Параметр	Величина
Рідина	Густина, ρ_p	1000 кг/м ³
	Пружність, C_p	$4,4 \times 10^{-16} \text{ Па}^{-1}$
	Динамічна в'язкість, μ_p	$1 \times 10^{-3} \text{ Н/м}^2$
Гірська порода	Модуль Юнга, E_n	60 ГПа
	Коефіцієнт Пуассона, μ_n	0,25
	Густина, ρ_n	2700 кг/м ³
	Водопроникність, k	$1 \times 10^{-19} \text{ м}^2$
	Константа Біотта, M_n	130 ГПа
Тріщина	Нормальна жорсткість, $k_{0,5}$	200 ГПа/м
	Гідравлічний розрив, b_{hr}	12,5 $\mu\text{м}$
	Довжина, l	1 м

На рисунку 2 представлена залежність значень тиску від часу з початку моменту росту тріщини до моменту руйнування гірської породи. На рисунку 3 представлено результати моделювання на різних етапах процесу руйнування гірської породи. Перед початком росту тріщини розподіл напруг відповідає класичним значенням для отворів круглого перерізу в лінійно-пружних, однорідних і ізотропних середовищах (рис. 3, а). Найменше дотичне напруження, що діє на стінки свердловини може бути розраховане з рівняння (2), для розрахункової моделі воно становить 20 МПа. На рисунку 3, в представлений новий максимум розподілу напружень після утворення тріщини руйнування. Як початкові умови під час розрахунку використовують напруження, що виникали в породі перед початком зародження тріщини (рис. 3, а) як початкові умови, а пізніше розраховувалися напруження, що спричинили “розкриття” тріщини.

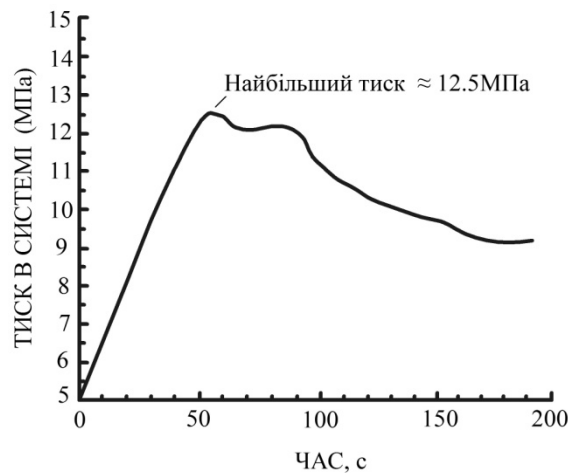


Рис. 2. Графік залежності тиску нагнітання рідини від часу в базовому варіанті

Гідравлічний розрив і нормальна жорсткість в таблиці 1 приймаються із типових значень для даного експерименту.

На рисунку 3, в зображено максимальні напруження тиску після початку утворення тріщини. При цьому значенні тиску рідини ширина зазору тріщини поблизу свердловини складає близько 7 мкм, де нормальні напруження є найбільшими, а з віддаленням від свердловини ширина зазору тріщини складає близько 10 мкм і значення нормальної жорсткості складає близько 300 ГПа/м. Слід також зазначити, що початок процесу руйнування порушує поля напруг і дотичне напруження на перетині тріщини і свердловини (початок тріщини) зменшується з 20 МПа до 14 МПа. Тому значення дотичного напруження, що розраховувалось за формулою (2) більше не дійсне для даних умов, що може призвести до помилки в розрахунку максимального головного горизонтального напруження. Через 30 секунд після початку нагнітання тиску, дія якого на стінки тріщини рівна 10 МПа, залежність тиску від часу суттєво відрізняється від раніше лінійної залежності (рис. 2). Це може бути спричинене перерозподілом поля напружень, в зв'язку зі збільшенням площі поверхні, на яку діє рідина. В цьому випадку максимальне значення тиску значно нижче, за максимальні значення на попередніх етапах. Це вказує на те, що швидкість нагнітання рідини занадто низька і є необхідність у її збільшенні.

Корегування параметрів проводилося з метою визначення найбільш важливих параметрів процесу руйнування породи при визначеному полі напружень. До найбільш важливих параметрів належать:

- 1) Параметри закріплення моделі.
- 2) Параметри росту тріщини.
- 3) Швидкість потоку (швидкість нагнітання рідини у свердловину).

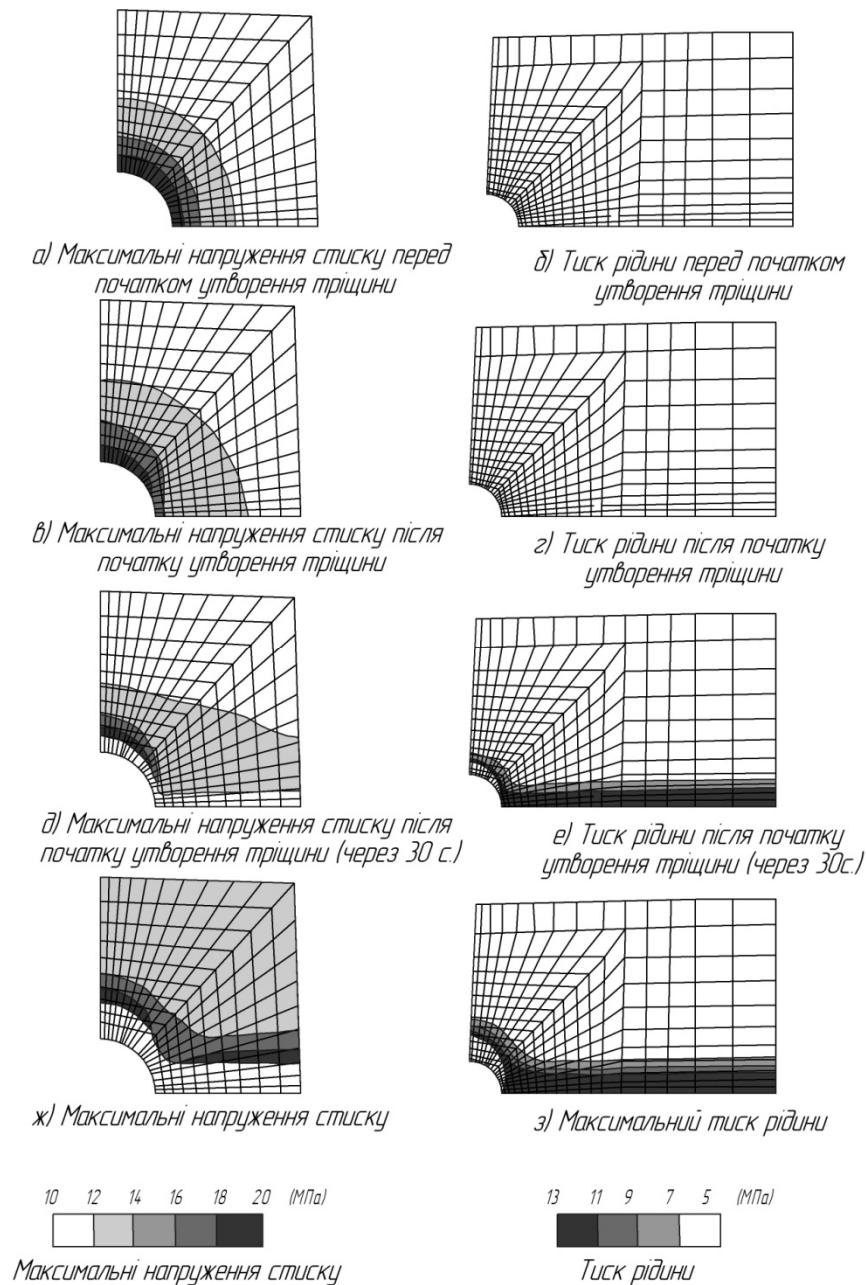


Рис. 3. Основні параметри моделювання при різних етапах нагнітання рідини

Збільшення довжини тріщини здійснюється при максимальному значенні тиску рідини (рис. 5). Як видно із графіків полів напружень, протягом першої фази нагнітання рідини тиск зменшується, а це означає, що тріщина поширюється в масиві породи протягом першого періоду нагнітання рідини. Для утворення тріщини завдовжки 0,5 м, суцільна порода, що оточує тріщину обмежує її розкриття. Залежність тиску нагнітання рідини від часу із врахуванням швидкості нагнітання рідини зображена на рисунку 6. При низькій швидкості потоку рідини, а отже і при меншому тиску, рідина має більше часу, щоб проникнути в тріщину і в той же час критична тріщина буде меншою, при якій швидкість потоку рідини рівна швидкості нагнітання рідини у систему. Моделювання базового випадку показує, що швидкість нагнітання рідини від 20 до 30 л/хв. буде відповідати максимальному тиску для створення нормальних напружень на початку тріщини.

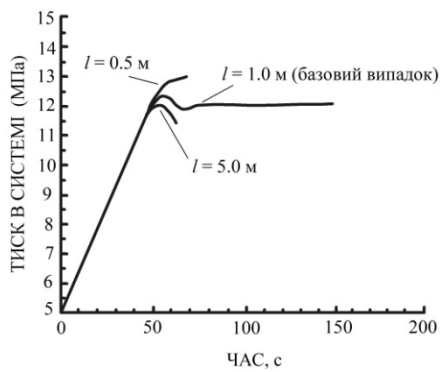


Рис. 4. Графік залежності тиску нагнітання рідини від часу з врахуванням зазору розкриття тріщини

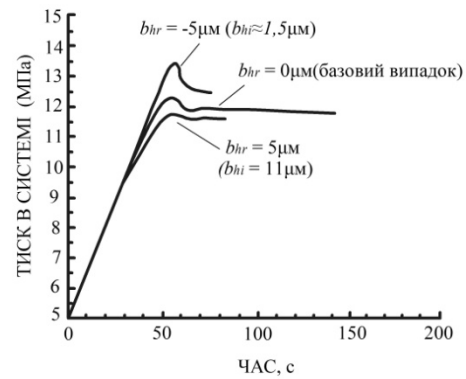


Рис. 5. Графік залежності тиску нагнітання рідини від часу з врахуванням довжини тріщини

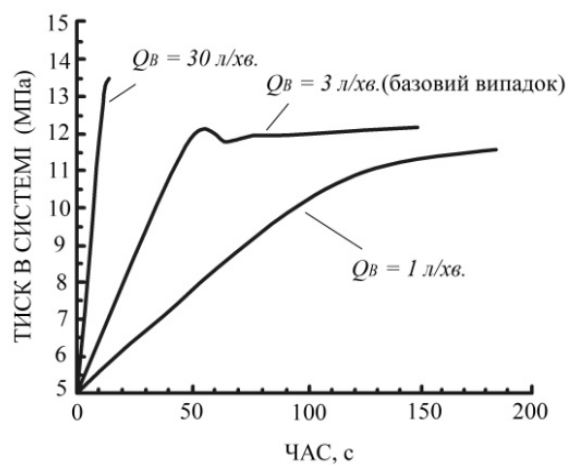


Рис. 6. Графік залежності тиску нагнітання рідини від часу із врахуванням швидкості нагнітання рідини

Висновки. Результати даного дослідження слід вважати попередніми і вони можуть бути дійсними тільки для властивостей матеріалу, що був заданий при моделюванні. Абсолютні значення отримані для швидкості нагнітання рідини у свердловину не можуть бути використані як загальні рекомендації. Подальше калібрування моделі необхідне для одержання найбільш реальних результатів для довільних властивостей матеріалу. За результатами досліджень встановлено, що зразок має вищу жорсткість і тріщина формується дещо меншою ніж при базовому варіанті. Цілком ймовірно, що деякі параметри спільної моделі недостатньо детально відображають вплив на процес росту тріщини ефективних нормальних напружень, що є дуже важливо при моделюванні даного процесу тому, що відкриття тріщини відбувається вже навіть при досить низьких значеннях ефективного напруження. Незалежно від обраної моделі буде відбуватися перерозподіл напружень у зв'язку з наявністю тріщин (рис. 3, в). Це вказує на те, що важко досягти теоретичного значення напружень для однорідного, лінійно-пружного середовища у відповідності з рівнянням (2). З іншого боку, результати випробувань показують, що тиск для початку росту тріщини дещо менший, ніж початковий тиск руйнування, який може відрізнитися залежно від властивостей міцності гірської породи. Можлива причина цієї розбіжності між моделюванням і результатами дослідження механічного зразка є те, що тиск для початку росту тріщини залежить від наявності вже існуючих тріщин в породі, що не розглядаються у моделі. Таким чином, модель руйнування гірської породи в поєднанні зі створенням геометричної моделі з реальними параметрами середовища будуть оптимальним підходом для моделювання процесу руйнування гірської породи гідравлічним методом.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Шашенко А.Н.* Геомеханические процессы в породных массивах : моногр. / *А.Н. Шашенко, Т.Майхерчик, Е.А. Сдвижкова.* – Днепропетровск : Национальный горный университет, 2005. – 319 с.
2. *Дидык Р.П.* Физические основы прочности : учебник / *Р.П. Дидык, Е.В. Кузнецов, В.Н. Забара.* – Д. : Наука и образование, 2005. – 608 с.
3. *Фадеев А.Б.* Метод конечных элементов в геомеханике / *А.Б. Фадеев.* – М. : Недра, 1987. – 236 с.
4. *Карасев Ю.Г.* Природный камень. Добыча блочного и стенового камня / *Ю.Г. Карасев, Н.Т. Бакка.* – СПб., 1997. – 428 с.
5. *Дубровський В.П.* Фізико-технічні властивості гірських порід : навч. посібник / *В.П. Дубровський.* – Житомир : ЖІТІ, 2000. – 362 с.
6. *Шашенко А.Н.* Некоторые задачи статистической геомеханики / *А.Н. Шашенко, С.Б. Тулуб, Е.А. Сдвижкова.* – К. : Пульсари, 2001. – 243 с.
7. *Томашевский В.Н.* Решение практических задач методами компьютерного моделирования / *В.Н. Томашевский, Е.Г. Жданова, А.А. Жолдаков.* – К. : Изд-во “Корнійчук”, 2001. – 268 с.
8. *Джон М.Смит.* Математическое и цифровое моделирование для инженеров и исследователей / *Джон М.Смит.* – М. : Машиностроение, 1980. – 293 с.

МАХНО Артур Миколайович – аспірант кафедри геотехнологій ім. проф. М.Т. Бакка Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- гірництво;
- сучасні невибухові методи видобування каменю;
- моделювання процесів гірничого виробництва.

СТЕНЮК Михайло Петрович – асистент кафедри геотехнологій ім. проф. М.Т. Бакка Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- гірництво;
- ГІС системи;
- моделювання процесів гірничого виробництва.

КАМСЬКИХ Олександр Валерійович – старший викладач кафедри геотехнологій ім. проф. М.Т. Бакка Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- гірництво;
- фізичні процеси гірничого виробництва.

Подано 13.01.2011