

**О.О. Фролов, д.т.н., проф.
М.І. Бельтек, аспірант
Т.В. Косенко, ст. викладач**

*Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

Обґрунтування вибору моделі вибухового руйнування скельного гірського масиву в програмному середовищі ANSYS AUTODYN

Представлено результати досліджень з вибору моделі руйнування скельного гірського масиву вибухом свердловинного заряду в середовищі ANSYS із застосуванням програмного комплексу інженерного аналізу AUTODYN та подальшим розрахунком процесу вибухового дроблення граніту. Доведено, що можливість спільного використання Ейлерової та Лагранжевої систем відліку є безсумнівною перевагою ANSYS AUTODYN, оскільки дозволяє одночасно змоделювати дію хвиль напружень у твердому середовищі та дію газів вибуху, які, за рахунок проникнення в тріщини, формують воронку дроблення. Виконані розрахунки показали ефективність вказаного програмного продукту та достовірність отриманих даних.

Для кожного матеріалу обґрунтовані рівняння стану моделі середовища: для гранітного масиву це рівняння стану Ріделя–Гієрмаєра–Тома (RHT); для вибухової речовини – рівняння Джонсона–Вілкінсона–Лі (JWL); поведінка забивки описується моделлю Друкера–Прагера; для повітря характерне рівняння стану ідеального газу (закони Бойля і Гей-Люссака).

Результати моделювання дії вибуху свердловинного заряду Анеміксу 70 в скельному масиві Пинязевецького родовища гранітів показало, що активний руйнуючий тиск газів вибуху діє в гірській породі протягом 0,35 мс. В подальшому деформування та руйнування масиву з поширенням тріщин відбувається за рахунок накопичених навантажень та інерції розльоту шматків породи, тобто корисної дії кінетичної енергії, яка продовжується до 1,0–1,5 мс.

Отримана еюра руйнувань гранітного масиву гірських порід за результатами моделювання в ANSYS AUTODYN засвідчила також руйнівну дію вибуху в донній частині свердловинного заряду, а саме на глибину до 0,7 м від нижнього торця заряду.

Ключові слова: ANSYS AUTODYN; скельний гірський масив; свердловинний заряд; вибухова речовина; тип вирішувача; рівняння стану моделі середовища; розрахункова модель.

Постановка проблеми та її зв'язок з важливими практичними завданнями. Вибух заряду вибухової речовини (ВР) в будь-якому середовищі являє собою складний динамічний процес. З метою одержання більших знань про складні фізико-механічні явища, які неможливо отримати експериментальними методами досліджень, науковцями рекомендуються чисельні моделювання таких динамічних процесів у середовищі, що підлягає руйнуванню. Зокрема, застосування сучасних засобів комп'ютерного моделювання вибухового руйнування масивів скельних гірських порід дає змогу виявити закономірності і оцінити характер тріщиноутворення для подальшої оптимізації параметрів буропідричних робіт. Під час розв'язання задач високошвидкісного динамічного удару, вибуху, гідро- та аеротечій, а також інших процесів, які супроводжуються високими швидкостями деформацій досліджуваного простору, широкого розповсюдження набули пакети прикладних програм, що використовують явний метод розв'язання рівнянь механіки суцільного середовища [1].

Одним з таких програмних продуктів є ANSYS, використання якого дозволяє достовірно передбачати поведінку об'єкта дослідження на всіх етапах комп'ютерного моделювання. Платформа комплексу ANSYS може об'єднати вирішення завдань теплообміну, гідрогазодинаміки та механіки твердого тіла в одну задачу [2, 3]. Для моделювання в середовищі ANSYS використовують сучасні програмні комплекси інженерного аналізу, такі як ANSYS CFD, ANSYS AUTODYN, LS-DYNA тощо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Науковці зазначають, що найбільш ефективним інструментом моделювання поведінки гірського масиву під час його руйнування вибухом є програмний продукт ANSYS AUTODYN, оскільки він надає змогу розв'язувати складні задачі нелінійних високошвидкісних процесів [4]. Модуль AUTODYN найповніше відображає фізику досліджуваного явища, що підтверджено накопиченим світовим досвідом у використанні цього продукту [5].

Під час моделювання в ANSYS AUTODYN можна використовувати чотири основні типи вирішувачів: Лагранжа, Ейлера, довільний Лагранжево-Ейлеровий, а також безсітковий SPH (метод згладжених частинок). При виборі типу вирішувача необхідно керуватися точністю та продуктивністю розв'язання поставленої задачі [6]. У цьому розрахунковому модулі найбільш повно розроблено алгоритм зв'язування окремих вирішувачів. Зокрема, алгоритм зв'язування Ейлерової розрахункової

сітки з Лагранжевою надає можливість вирішення завдань із взаємодії течії рідин і газів з твердими тілами [7].

Моделювання фізико-механічних процесів у середовищі ANSYS AUTODYN реалізується за допомогою чисельного розв'язання системи диференціальних рівнянь у частинних похідних, що являє собою сукупність законів збереження енергії, імпульсу і маси, а також додаткових рівнянь та моделей різних матеріалів. Чисельними методами розв'язання цих рівнянь у модулі AUTODYN є метод скінченних елементів, метод скінченних об'ємів і метод скінченних різниць.

Шляхом завдання відповідної моделі гірської породи визначаються взаємозв'язки та кореляційні залежності між основними фізико-механічними параметрами масиву, а також відбувається їхнє зв'язування з основними термодинамічними характеристиками. Моделювання руйнування середовища здійснюється на основі розв'язання рівнянь стану, моделі міцності (критерію) та моделі руйнування.

Як зауважують дослідники [8], спільне використання Ейлерової та Лагранжевої систем відліку в програмному забезпеченні ANSYS AUTODYN особливо ефективно для моделювання дії вибуху у твердому середовищі. Ейлерова система найкраще відповідає моделюванню детонації вибухових речовин, тому що в цьому разі матеріал протікає через геометрично постійну сітку, яка може сприймати значні деформації від потоків газу вибуху. Гірські породи рекомендовано моделювати Лагранжевою системою відліку. В цьому випадку задана сітка рухається разом із фрагментами породи і повною мірою відображає процеси деформування та руйнування. Зазначені системи відліку поєднуються в ANSYS таким чином, що енергія вибуху передається між ними без спотворень. А це відповідає найбільш точному моделюванню усього процесу руйнування скельного гірського масиву вибухом.

Моделі кожного матеріалу притаманні такі складові [1]:

– рівняння стану (EOS), що пов'язують напруження з деформацією і внутрішньою енергією (або температурою);

– модель міцності, тобто реакція матеріалу на зовнішню дію. Зокрема, тверді матеріали спочатку можуть реагувати пружно, але потім, у разі надвисоких динамічних навантажень, вони можуть досягати напруженого стану, що перевищує межу текучості, і деформуватися пластично. ANSYS AUTODYN має декілька моделей середовища, зокрема: RHT-модель, Друкера–Прагера, Купера–Саймонда та ін.;

– модель руйнування матеріалу, яка визначає початок тріщиноутворення та руйнування шляхом порівняння з критичним значенням напружень та/або деформацій. Моделі руйнування враховують різні способи руйнування матеріалів (стиснення, розтягнення, зсув);

– модель ерозії матеріалу використовується для подолання проблем, викликаних великими спотвореннями сітки Лагранжа, головним чином, під час моделювання процесу крихкого руйнування. Зокрема, у разі великих порушень сітки, занадто деформований елемент видаляється з розрахункової області, а сили, що діють на нього, перерозподіляються на сусідні елементи [6].

Для моделювання можна використовувати матеріали як із вбудованої в AUTODYN бібліотеки матеріалів, так і додавати нові матеріали до вже наявних [9].

Для скельного масиву гірських порід найбільш прийнятним є модель середовища RHT (модель крихкого матеріалу Ріделя–Гермаера–Тома), яка дає можливість прогнозувати щільність тріщин і фрагментацію в породі. RHT достатньо точно надає поверхні руйнування матеріалу залежно від величини тиску на фронті ударної хвилі, залишкові поверхні руйнування, граничні поверхні пружності та деформаційне зміцнення. Це дозволяє накопичувати фрагментацію руйнування твердого тіла під час дії хвиль напружень як розтягнення, так і стиснення, тобто два критичних стани напруження.

Для ВР найбільш доцільним є гідродинамічні моделі матеріалу з використанням рівняння стану Джонсона–Вілкінсона–Лі (JWL), яке описує розширення продуктів детонації високоенергетичних ВР [3]:

$$p = A \left(1 - \frac{w\eta}{R_1} \right) e^{-\frac{R_1}{\eta}} + B \left(1 - \frac{w\eta}{R_2} \right) e^{-\frac{R_2}{\eta}} + wpe, \quad (1)$$

де p – тиск на фронті детонаційної хвилі; ρ – щільність ВР на фронті детонаційної хвилі; $\eta = \rho / \rho_0$ (ρ_0 – початкова щільність ВР); A, B, R_1, R_2, w – константи для кожного типу ВР, значення яких для багатьох поширених ВР визначено з динамічних експериментів; e – питома внутрішня енергія.

Забивка у свердловинному заряді ВР, як правило, представлена сипучим матеріалом (зазвичай пісок або відсів). Для нього найбільш прийнятним є розширена модель Друкера–Прагера, яка враховує ефекти, що пов'язані з гранульованими матеріалами. Крім зміцнення під тиском газів вибуху, модель також враховує зміцнення під дією щільності та зміну модуля зсуву залежно від щільності.

Межа плинності складається з двох компонентів, перший залежить від щільності, другий – від тиску

$$\sigma = \sigma_p + \sigma_r, \quad (2)$$

де σ , σ_p , σ_r – відповідно загальна межа плинності, межа плинності за тиском та межа плинності за густиною.

Оскільки процес вибухового руйнування граніту відбувається в атмосферному повітрі, то воно є невід'ємною частиною загальної моделі руйнування. Однією з найпростіших форм рівняння стану

повітря є рівняння стану ідеального політропного газу, яке застосовують у задачах, пов'язаних із рухом газів. Воно може бути отримане із законів Бойля і Гей-Люссака та виражене у формі

$$p = (\gamma - 1) \rho e, \quad (3)$$

де γ – значення адіабатичної експоненти; ρ – щільність повітря.

Для уникнення ускладнень при моделюванні з декількома матеріалами (початкові невеликі тиски в газі створюватимуть невеликі небажані швидкості) рівняння (3) модифіковано до вигляду

$$p = (\gamma - 1) \rho e - P_{shift}, \quad (4)$$

де P_{shift} – невеликий початковий тиск для забезпечення нульового значення початкового тиску.

Вибір правильної моделі окремих матеріалів та речовин має дуже важливе значення, оскільки вони пов'язують внутрішню енергію, напруження та деформації.

Мета дослідження. Враховуючи наведений вище аналіз наукових публікацій з питань вибору програмного комплексу в середовищі ANSYS для моделювання дії вибуху в деформованому твердому тілі, сформульовано мету досліджень, яка полягає в обґрунтуванні розрахункової моделі вибухового руйнування скельного гірського масиву в програмному продукті ANSYS AUTODYN та отриманні результатів моделювання для конкретних умов гірничого виробництва.

Викладення основного матеріалу. Для визначення об'єму та розмірів зони дроблення скельного гірського масиву, порушеного дією вибуху свердловинного заряду, виконано комп'ютерне моделювання динамічного руйнування масиву гірських порід вибухом у програмному комплексі ANSYS AUTODYN.

Зазначене моделювання було проведено для умов Пинязевецького родовища гранітів. Як ВР прийнято «Анемікс 7». Забивкою у свердловинному заряді ВР слугував пісок. Параметри свердловинного заряду: діаметр свердловини – 200 мм, загальна довжина свердловини – 3,0 м; довжина заряду ВР – 2,0 м; довжина забивки з піску – 1,0 м.

Конфігурація моделі, а також місце розташування точок спостережень зображено на рисунку 1 [10].

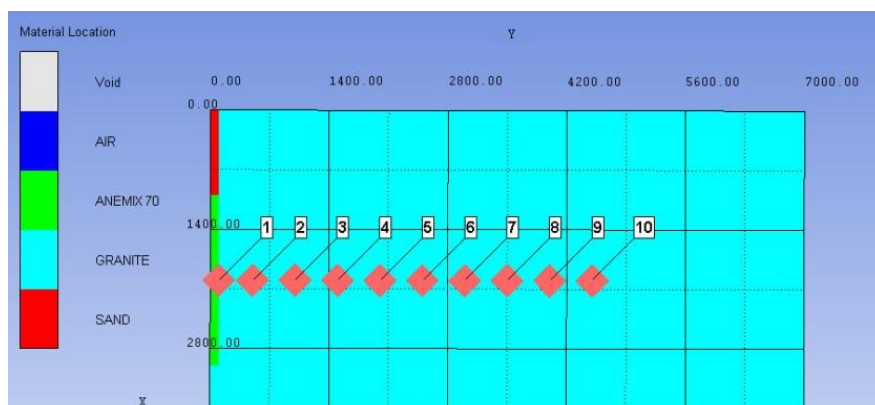


Рис. 1. Конфігурація моделі та розташування точок спостереження

Точки спостереження були додані в модель для визначення змін у часі значень тиску та зони руйнування. Всі точки спостереження розташовані на одній горизонтальній лінії посередині заряду ВР. Точка 1 розташована на межі між зарядом ВР та масивом гірських порід і призначена для визначення зміни тиску газів вибуху з плином часу, точки 2–10 розташовані через кожні 0,5 м, їх завдання полягає в спостереженні за ступенем руйнування масиву.

Основні параметри розрахункової сітки представленої моделі руйнування наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Основні параметри кінцево-елементної розрахункової сітки

Об'єкт	Розмір комірки, мм	Кількість комірок	Кількість вузлів	Вирішувач	Рівняння стану моделі
Повітря	20	122500	123201	Ейлер	Ідеальний газ
ВР («Анемікс 70»)		500	606	Ейлер	Jones–Wilkins–Lee (JWL)
Забивка (пісок)		250	306	Лагранж	Ущільнення
Граніт		68000	68541	Лагранж	Riedel–Hiermaier–Thom (RHT)

Основні параметри ВР «Анемікс 70» наведено в таблиці 2.

Основні параметри вибухової речовини «Анемікс 70»

Параметр	Одиниця виміру	Значення
Густина	кг/м ³	1220
Швидкість детонації	м/с	5000
Температура вибуху	°C	2163
Тротильовий еквівалент по теплоті вибуху	–	0,73
Теплота вибуху	кДж/кг	3117
Об’єм газів	л/кг	1004
Кисневий баланс	%	–1,95
Критичний діаметр	мм	90

Параметри для визначення тиску на фронті детонації, згідно з рівнянням стану моделі JWL, наведено на рисунку 2.

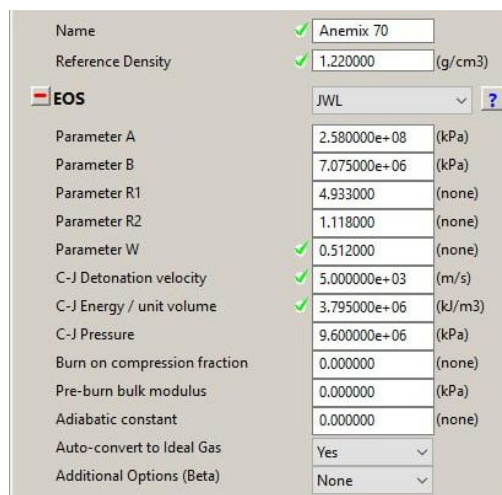


Рис. 2. Параметри рівняння стану JWL

Основні фізико-механічні характеристики, які описують поведінку граніту Пинязевицького родовища під час його руйнування, наведено на рисунку 3.

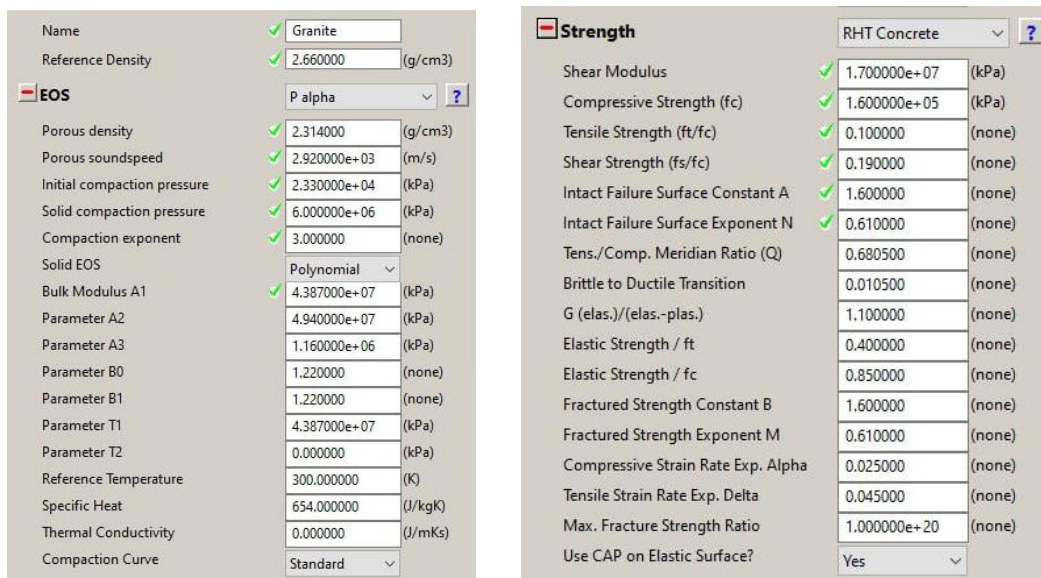


Рис. 3. Основні фізико-механічні характеристики граніту для моделі RHT

За результатами розрахунків у програмному комплексі ANSYS AUTODYN встановлено, що активність тиску на фронті детонаційної хвилі вичерпується за 0,35 мс (рис. 4). Проте під дією накопичених навантажень та інерції масив продовжує деформуватися в окремих місцях і зазнавати подальшого поширення тріщин, тобто кінетична енергія дії вибуху свердловинного заряду ВР вичерпується лише за 1,0–1,5 мс (рис. 5).

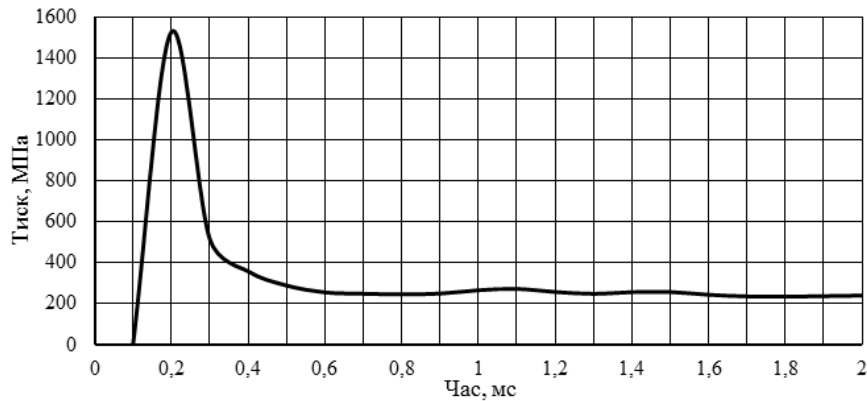


Рис. 4. Зміна тиску продуктів детонації на межі заряду ВР та масиву гірських порід

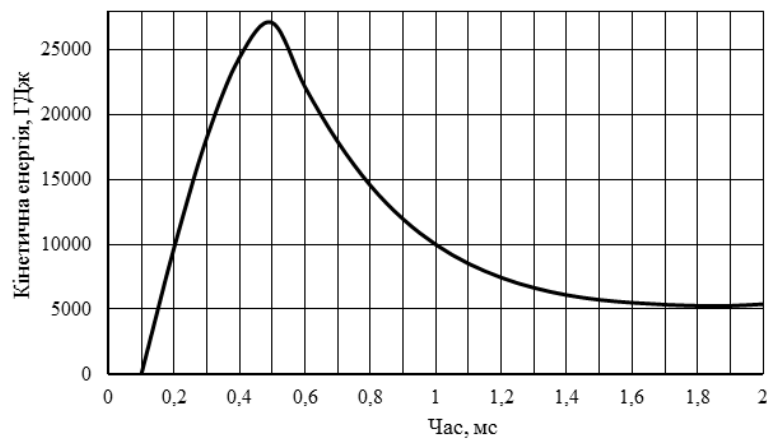


Рис. 5. Зміна дії кінетичної енергії вибуху свердловинного заряду ВР у часі

Характер руйнування та тріщиноутворення в гранітному масиві гірських порід від дії вибуху свердловинного заряду «Анемікс 70» представлено на рисунку 6.

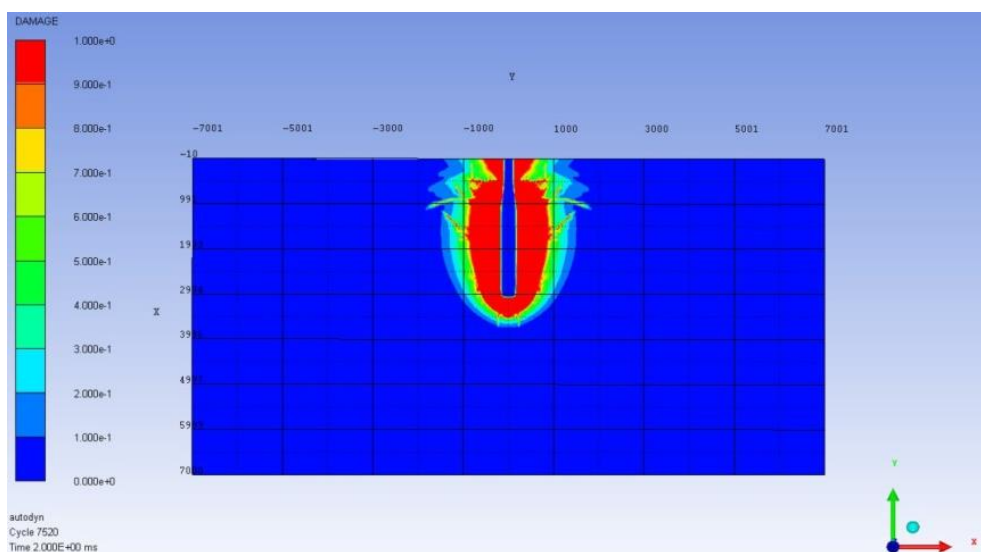


Рис. 6. Енюра руйнування граніту для суцільного скельного масиву гірських порід

Для визначення об'єму порушеної вибухом зони було використано програмне забезпечення Blender (рис. 7). За допомогою нього результати, які отримані в ANSYS AUTODYNE, були оброблені і використані для створення об'ємної фігури обергання. Для цих умов об'єм зони руйнування становить $22,87 \text{ м}^3$, радіус руйнувань на поверхні оголення масиву – 1,8 м.

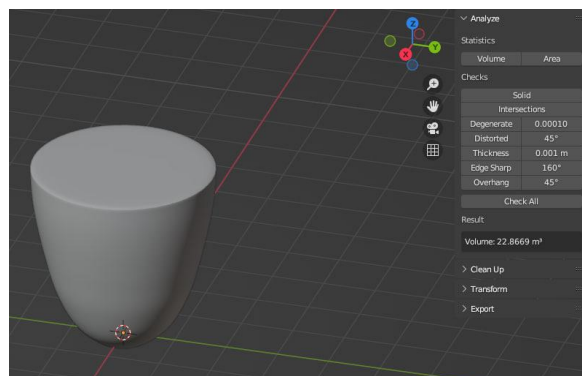


Рис. 7. Об'ємна модель порушеної вибухом зони масиву з повною міцністю

Результати моделювання підтверджують результати експериментальних досліджень науковців з визначення параметрів зони руйнування скельних порід, отриманих під час підривання свердловинних зарядів ВР [11, 12]. Також варто виокремити дію вибуху в донній частині заряду. Як видно з епюри руйнування (рис. 6), руйнування гірського масиву під свердловинним зарядом відбулося на глибину 0,7 м.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Результати проведеного комп'ютерного моделювання процесу вибухового руйнування скельного гірського масиву в середовищі ANSYS AUTODYN показали ефективність та достовірність цього програмного продукту. Спільне використання Ейлерової та Лагранжевої систем відліку дозволило одночасно змоделювати дію хвиль напружень у твердому середовищі, які «передруйнують» гірський масив, та дію газів вибуху, які сприяють, за рахунок проникнення в тріщини, розвалюванню порушеного масиву і формуванню зони дроблення. Це безсумнівна перевага вказаного програмного комплексу, яку неможливо було реалізувати математичним моделюванням і подальшим «ручним» розрахунком.

Форма та параметри зони руйнування масиву, складеного гранітом, під час моделювання в ANSYS AUTODYN підтверджуються результатами наукових аналітичних та експериментальних досліджень науковців минулих років.

Встановлено, що активний руйнуючий тиск газів вибуху діє в гірській породі протягом 0,35 мс (рис. 4), а подальше деформування масиву з поширенням тріщин відбувається за рахунок накопичених навантажень та інерції розльоту шматків породи, тобто дії кінетичної енергії впродовж 1,0–1,5 мс (рис. 5). Отримані дані з моделювання є дуже важливими для формування схеми підривання вибухових свердловин на промисловому блоці.

Стосовно результатів моделювання для конкретних умов Пинязевецького родовища гранітів, то вирізимо дію вибуху свердловинного заряду «Анемікс 70» в його донній частині, а саме руйнування відбулося на глибину 0,7 м від дна заряду. Цей факт необхідно враховувати під час визначення параметрів буропідричних робіт.

З урахуванням отриманих результатів з моделювання дії вибуху свердловинного заряду ВР у скельних породах у середовищі ANSYS подальші наукові дослідження будуть спрямовані на встановлення впливу міцнісних характеристик гірського масиву (зокрема тріщинуватості) на форму, розміри та об'єм воронки руйнування.

Список використаної літератури:

1. Кулинич В.Д. Удосконалення технології вибухового руйнування шляхом зміни механічних властивостей середовища в ближній зоні вибуху : дис. ... канд. техн. наук : 05.15.09 / В.Д. Кулинич. – Кременчук : КрНУ імені Михайла Остроградського, 2020. – 174 с.
2. ANSYS : офіційний сайт [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.ansys.com>.
3. ANSYS Autodyn User's Manual. – Southpointe, Canonsburg, 2013. – Release 15.0. – 502 p.
4. Гришанова І.А. Розв'язок задач проєктування приладів та систем з використанням ANSYS і MATHCAD : підручник / І.А. Гришанова, Л.П. Згуровська, Ю.В. Киричук. – Київ : Політехніка, 2022. – 180 с.
5. Faserova D. Numerical Analyses of Buried Mine Explosions with Emphasis on Effect of Soil Properties on Loading : Ph.D. Thesis of dissertation / D.Faserova. – UK : Cranfield University, 2006. – 239 p.

6. Simulation of dynamic fracture of the borehole bottom taking into consideration stress concentrator / V.Vorobyov, M.Pomazan, S.Shlyk, L.Vorobyova // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 3, No. 1 (87). – P. 53–62.
7. Технологія вибухового руйнування середовища шляхом зміни механічних властивостей в ближній зоні вибуху : монографія / В.Д. Кулинич та ін. – Кременчук : НОВАБУК, 2022. – 183 с.
8. Бельтек М.І. Моделювання дії вибуху свердловинного заряду в природно порушеному тріщинуватому масиві в середовищі Ansys / М.І. Бельтек, Н.А. Євпак, О.О. Фролов // Тези Всеукраїнської науково-практичної онлайн-конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки, 13–17 травня. – Житомир : Житомирська політехніка, 2024. – С. 147–148.
9. Chemezov D.A. Description of library materials software package ANSYS AUTODYN / D.A. Chemezov // ISJ Theoretical & Applied Science. – 2014. – Vol. 16, No. 8. – P. 4–23.
10. Beltek M.I. Results of modeling the explosion of a borehole charge in a fractured rock massif in ANSYS AUTODYN / M.I. Beltek, N.A. Evpak // Енергетика. Екологія. Людина : збірник наукових праць XVI науково-технічної конференції НН ІЕЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : НН ІЕЕ, 2024. – С. 124–128.
11. Фролов О.О. Лабораторні дослідження впливу хвиль напружень під час вибуху на параметри руйнування моделі / О.О. Фролов, В.В. Котенко // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – 2014. – № 3 (70). – С. 124–128.
12. Фролов О.О. Керування енергетичними потоками при вибуховому руйнуванні гірських порід на кар'єрах : монографія / О.О. Фролов, А.І. Крючков, Т.В. Косенко. – Київ : Політехніка, 2019. – 196 с.

References:

1. Kulynych, V.D. (2020), «Udoskonalennia tekhnolohii vybukhovoho ruinuвання shliakhom zminy mekhanichnykh vlastyvostei sere dovyscha v blyzhnii zoni vybukhu», Ph.D. Thesis of dissertation, 05.15.09, KrNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho, Kremen chuk, 174 p.
2. ANSYS, ofitsiyni sait, [Online], available at: <https://www.ansys.com>
3. ANSYS Autodyn User's Manual (2013), Southpointe, Canonsburg, Release 15.0, 502 p.
4. Hryshanova, I.A., Zghurovska, L.P. and Kyrychuk, Yu.V. (2022), *Rozviazok zadach proiektuvannia prykladiv ta system z vykorystanniam ANSYS i MATHCAD*, pidruchnyk, Politekhnik, Kyiv, 180 p.
5. Faserova, D. (2006), «Numerical Analyses of Buried Mine Explosions with Emphasis on Effect of Soil Properties on Loading», Ph.D.Thesis of dissertation, Cranfield University, UK, 239 p.
6. Vorobyov, V., Pomazan, M., Shlyk, S. and Vorobyova, L. (2017), «Simulation of dynamic fracture of the borehole bottom taking into consideration stress concentrator», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 3, No. 1 (87), pp. 53–62.
7. Kulynych, V.D. et al. (2022), *Tekhnolohiia vybukhovoho ruinuвання sere dovysheha shliakhom zminy mekhanichnykh vlastyvostei v blyzhnii zoni vybukhu*, monohrafiia, NOVABUK, Kremen chuk, 183 p.
8. Beltek, M.I., Yevpak, N.A. and Frolov, O.O. (2024), «Modeliuвання dii vybukhu sverdlovyvnoho zariadu v pryrodno porushenom u trishchynuvatomu masyvi v sere dovyschi Ansys», *Tezy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi onlain-konferentsii aspirantiv, molodykh uchenykh ta studentiv, prysviachenoi Dniu nauky*, 13–17 travnia, Zhytomyrska politekhnik, Zhytomyr, pp. 147–148.
9. Chemezov, D.A. (2014), «Description of library materials software package ANSYS AUTODYN», *ISJ Theoretical & Applied Science*, Vol. 16, No. 8, pp. 4–23.
10. Beltek, M.I. and Evpak, N.A. (2024), «Results of modeling the explosion of a borehole charge in a fractured rock massif in ANSYS AUTODYN», *Enerhetyka. Ekolohiia. Liudyna*, zbirnyk naukovykh prats XVI naukovo-tekhnichnoi konferentsii NN ІЕЕ КРІ ім. Ігоря Сікорського, NN ІЕЕ, Kyiv, pp. 124–128.
11. Frolov, O.O. and Kotenko, V.V. (2014), «Laboratorni doslidzhennia vplyvu khvyl napruzhen pid chas vybukhu na parametry ruinuвання modeli», *Visnyk ZhDTU. Tekhnichni nauky*, No. 3 (70), pp. 124–128.
12. Frolov, O.O., Kriuchkov, A.I. and Kosenko, T.V. (2019), *Keruvannia enerhetychnymy potokamy pry vybukhovomu ruinuванні hirskykh porid na karierakh*, monohrafiia, Politekhnik, Kyiv, 196 p.

Фролов Олександр Олександрович – доктор технічних наук, професор кафедри геоінженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0001-8053-2653>.

Наукові інтереси:

- буропідривної роботи на кар'єрах;
- розробка родовищ корисних копалин.

E-mail: frolov@geobud.kiev.ua.

Бельтек Микита Ігорович – аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0002-8048-0635>.

Наукові інтереси:

- розробка родовищ корисних копалин.

E-mail: nikitabeltek@gmail.com.

Косенко Тетяна Володимирівна – старший викладач кафедри геоінженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0001-9635-1427>.

Наукові інтереси:

– розробка родовищ корисних копалин.

E-mail: tanitakos1@gmail.com.

Frolov O.O., Beltek M.I., Kosenko T.V.

**Justification of the choice of the model of rock mass destruction by explosion
in the ANSYS AUTODYN software environment**

The paper presents the results of research on the selection of the model of rock massif destruction by explosion of a borehole charge in ANSYS environment with the use of the program complex of engineering analysis AUTODYN, as well as the calculation of the process of explosive crushing of granite. The joint use of Euler and Lagrange reference systems is an undoubted advantage of ANSYS AUTODYN. Such calculation allows modelling simultaneously the action of stress waves in the solid medium and the action of explosion gases, which form the crushing funnel by penetrating into the cracks. The results obtained showed the effectiveness of this software product and the reliability of the data obtained.

In the scientific article the choice of equations of state of the medium model for each material is justified: for granite mass – Riedel-Hiermeier-Thom (RHT) model equation; for explosive – Johnson-Wilkinson-Lee (JWL) equation of state; the behavior of the borehole is described by the Drucker-Prager model; for air is characterized by the ideal gas equation of state (Boyle and Gay-Lussac laws).

The results of modeling of the explosion action of the Anemix 70 borehole charge in the rock massif of the Pinyazevitsky granite deposit showed that the active destructive pressure of the explosion gases acts in the rock for 0,35 ms. Further, deformation and destruction of a massif occurs at the expense of the accumulated loads and inertia of flight of pieces of a rock. Thus, the useful effect of kinetic energy continues up to 1,0–1,5 ms.

The epura of destruction of the granite rock massif, which is obtained from the results of modeling in ANSYS AUTODYN, also showed the destructive effect of the explosion in the bottom part of the borehole charge. It was found that the rock mass is destroyed to a depth of 0,7 m from the bottom end of the charge.

Keywords: ANSYS AUTODYN; rock massif; borehole charge; explosive; solver type; equation of state of the medium model; computational model.

Стаття надійшла до редакції 14.10.2024.