

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЕФОРМУВАННЯ НЕОДНОРІДНИХ ГІРСЬКИХ ПОРІД В УМОВАХ КОНТРОЛЬОВАНОГО РУЙНУВАННЯ

Представлены методика и алгоритм имитационного моделирования деформирования образцов горных пород за пределом прочности в режиме «жесткого» деформирования. Показано, что задавая при расчетах распределение свойств по всему объему образца в соответствии с логнормальным законом, можно получить полные диаграммы деформирования, достаточно близкие к реальным, не прибегая к сложным лабораторным экспериментам.

SIMULATION DEFORMATION OF HETEROGENEOUS ROCK IN THE CONTROLLED DESTRUCTION MODE

The methodology and algorithm simulation of rock samples deformation in the controlled destruction mode are described. Show that you can get the full stress-strain diagram of the rock, which fits very close to real diagrams, and does not use difficult laboratory experiments. For this when using the algorithm properties in the model should be distributed in accordance with the lognormal distribution law.

Вступ. Проблема оцінки міцності гірських порід в складному напруженому стані – одна з найважливіших в геомеханіці. У результаті вона зводиться до порівняння еквівалентного напруження з межею міцності на стиск. Маючи добре обґрунтований критерій міцності, можна аналітично вирішити і зворотну задачу – тобто прогнозувати міцність гірських порід, будувати паспорти міцності, тобто вивчати процес руйнування гірських порід на чисельних моделях. Такі моделі досліджуються за допомогою програмних комплексів, в основі яких лежить один з чисельних методів. Для цих цілей дуже добре підходить метод кінцевих елементів (МКЕ) [1].

Стандартні дослідження процесу руйнування гірських порід проводяться шляхом випробувань порідних зразків (блоків) за відповідними методиками, тобто по суті, випробувань фізичних моделей, що імітують реальний порідний масив. При цьому витрачаються значні зусилля для ліквідації недосконалості самого процесу фізичного моделювання, таких як торцеві умови, якість обробки поверхонь зразків, особливостей випробувальних машин, похибок вимірювальних приладів і тому подібне. Для слабких гірських порід навіть саме виготовлення зразків часто представляє непросту проблему, особливо для випробувань в режимі контрольованого руйнування, що дуже важливо для імітації реальних умов деформації порідного масиву. Усі вищезгадані недоліки фізичного моделювання призводять до того, що експериментальні дані, отримані шляхом лабораторних випробувань порідних зразків, є до певної міри величинами випадковими, тому для отримання точніших результатів необхідно виконати велику кількість лабораторних дослідів, проведення яких дуже трудомістко і потребує істотних матеріальних витрат.

Завдяки розвитку і доступності обчислювальної техніки тепер є реальна

можливість використовувати комп'ютерне моделювання при проведенні досліджень геомеханічних процесів замість натурних і лабораторних випробувань. Комп'ютерне моделювання процесу руйнування порідних зразків в об'ємному напруженому стані на відміну від фізичного моделювання позбавлене зазначених вище недоліків. Воно дозволяє обмежитися визначеною, добре обґрунтованою, теорією міцності і результатами звичайних випробувань зразків гірських порід на одновісне стискування (розтягування, зрушення). При цьому можна врахувати природну варіацію цих параметрів, задаючи в комп'ютерній стохастичній моделі параметри того або іншого закону їх розподілу.

Метою цієї статті є опис підходу і результатів чисельного експерименту по дослідженню процесу руйнування зразка гірської породи в режимі контрольованого руйнування.

Виклад основного матеріалу. Відомі два види випробувань гірських порід на одновісне стискування:

- в умовах заданих навантажень;
- в умовах заданих деформацій.

У першому випадку на пульті пресу задають певне навантаження (напруження – σ_i) і вимірюють відповідну їй подовжню (поперечну) відносну деформацію – ε_i . Наприкінці випробувань визначають граничне напруження (межу міцності на одновісне стискування – R_c) і граничне значення подовжньої деформації ε_k . Після цього зразок лавиноподібно руйнується. У цьому режимі відбувається, наприклад, навантаження порід покрівлі в лаві при збільшенні довжини консолі порід покрівлі.

У другому випадку задаються значення деформацій і вимірюється відповідні ним напруження. Для цього використовують особливі, так звані «жорсткі», випробувальні машини [2-4]. При цьому поведінка порідних зразків в процесі їх деформації до моменту руйнування повністю співпадає з поведінкою таких же зразків, що навантажуються в режимі заданих навантажень.

Інакше йдуть справи з руйнуванням структурно неоднорідних гірських порід за межею міцності (рис. 1). При жорстко заданій деформації першими руйнуються структурні елементи, найбільш «невдало» орієнтовані по відношенню до зовнішнього навантаження. При цьому частина навантаження, що доводиться на них, перерозподіляється на інших, більш «вдало» розташовані елементи. Зразок набуває нову структуру, якій відповідає нижча по відношенню до початкової R_c межа міцності на одновісне стискування R_{ci} . Петля гістерезису, отримана при знятті величини навантаження до нуля, характеризуватиме рівень дисипації пружної енергії. Наприкінці навантаження будуть зруйновані усі внутрішні зв'язки і зразок, зовні зберігаючи форму і залишкову міцність $R_{ост}$ за рахунок сил тертя, перейде в стан так званої еквиволюміальної течії. Форма спадаючої частини кривої деформування по суті є характеристикою структури конкретної літологічної різниці.

Таким чином руйнується порідний масив навколо поодиноких гірничих виробок, в ціликах і в багатьох інших елементах підземних структур. Роль «жорсткого» пресу в цьому випадку відіграє частина порідного масиву, що пружно деформується. Ця особливість руйнування гірських порід знаходить своє віддзеркалення в розрахункових схемах (моделях), в аналітичних розрахунках [2, 5] і чисельному моделюванні [6-9].

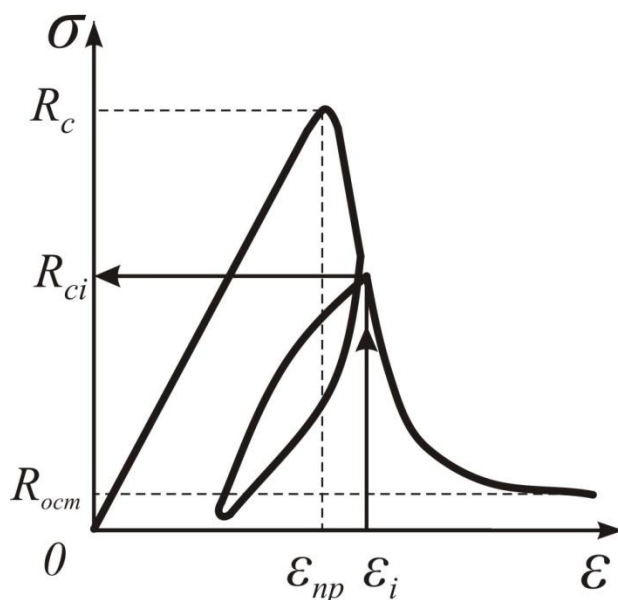


Рис. 1 – Випробування зразків гірських порід на однісіне стискування в режимі заданих деформацій

При цьому у разі чисельного моделювання доводиться застосовувати особливі прийоми, що стосуються не лише змін в початкових моделях, але і в архітектурі відповідного програмного продукту. Так, наприклад, на кафедрі будівництва і геомеханіки в НГУ [10, 11] були внесені відповідні зміни в алгоритм розрахунку, що враховує особливості деформації і руйнування гірських порід за межею міцності.

Дослідження, виконані О.М. Шашенком, О.О. Сдвижковою в області масштабного ефекту в гірських породах [10, 11] показали, що гістограми розподілу міцності різних вуглевміщуючих порід підкоряються певним законам розподілу: нормальному, логнормальному, Вейбулла та ін.

Складний напружений стан, в якому знаходяться гірські породи навколо виробок, можна привести до еквівалентного однісісного, використовуючи ту або іншу теорію міцності. Тоді, знаючи характер навантаження та вигляд кривої розподілу міцності структурних елементів в породі, можна автоматично врахувати цю обставину в алгоритмі розрахунку, минаючи стадію трудомістких лабораторних випробувань.

Використана методика чисельного моделювання процесу деформації порідних зразків за межею міцності полягала в наступному. Графік реальних ви-

пробувань конкретної гірської породи перебудовувався. На вертикальній і горизонтальній осях координат усі значення напружень і деформацій ділилися на їх найбільші значення (R_c) і (ε_{\max}). Тоді з'являлася можливість порівнювати між собою гірські породи однієї літологічної різниці, що мають різну міцність.

В створеній об'ємній комп'ютерній моделі (рис. 2) вертикальна деформація ($\varepsilon_1 = 1,2,3,4,5,6,7$) задавалася у відсотках від довжини зразка, а його бічні грані були вільні від навантажень. Вертикальні і горизонтальні переміщення на нижній грані зразка задавалися рівними нулю – це відповідає наявності жорсткої нижньої плити пресу і сухому тертю на контакті між гранню зразка і плитою пресу.

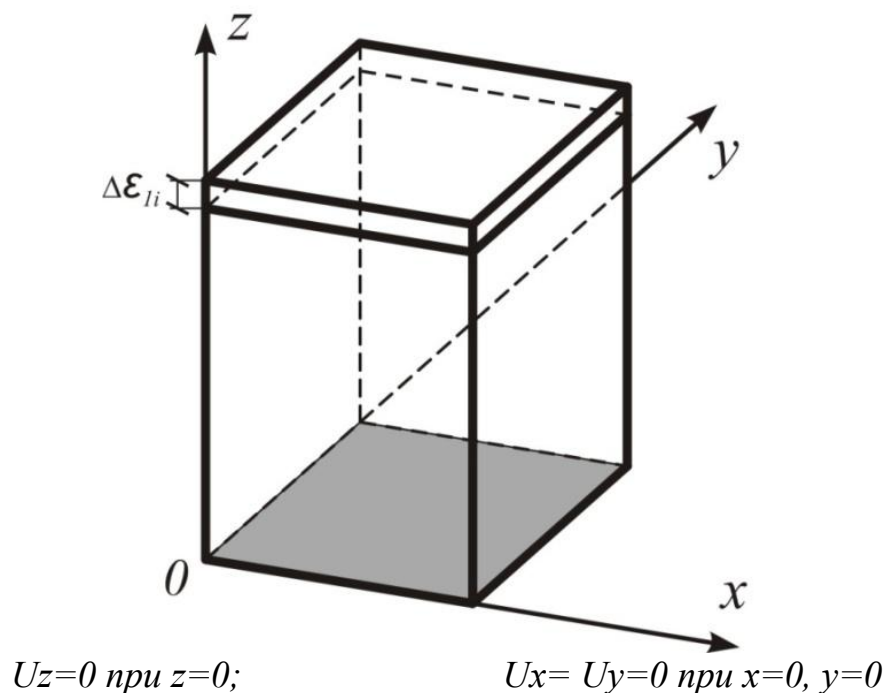


Рис. 2 – Об'ємна комп'ютерна модель навантаження породного зразка в режимі заданої деформації

В процесі приросту вертикальних деформацій в центрі кожного елемента визначалася величина еквівалентного напруження σ_{ei} , яка порівнювалася з межею міцності на одновісне стискування R_c . Значення межі міцності R_{ci} в кожному елементі задавалися за допомогою датчика випадкових чисел за логнормальним законом розподілу. Параметри закону приймалися на основі обробки даних лабораторних випробувань зразків на одновісне стискування (рис. 3).

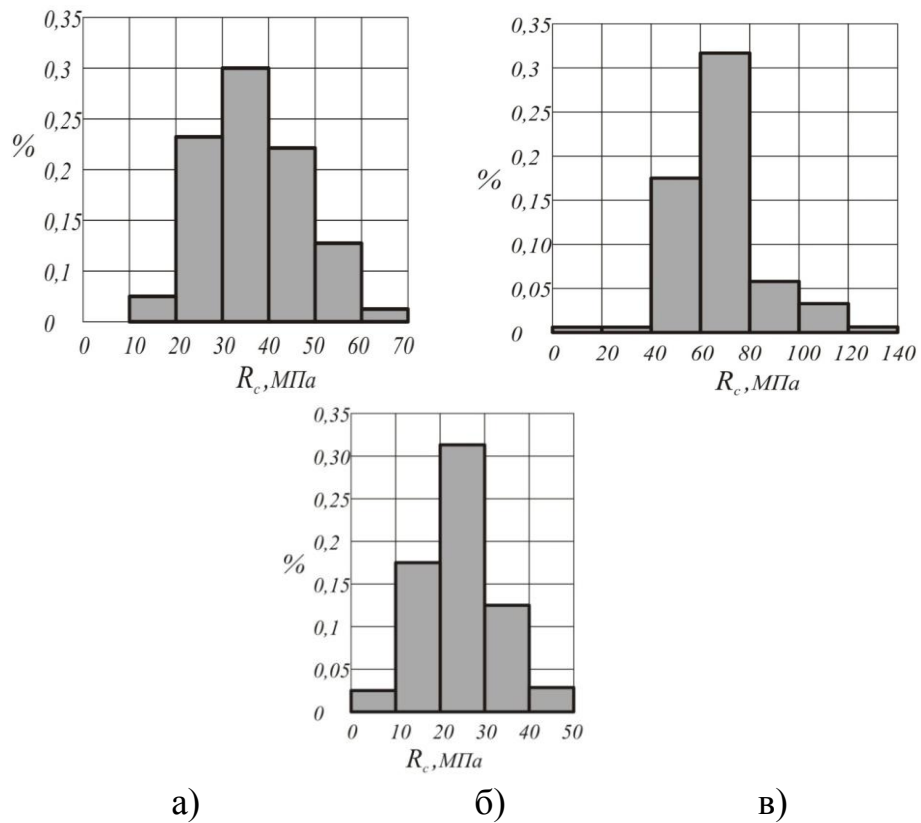


Рис. 3 – Гістограми розподілу меж міцності вміщуючих порід і руди (ш. «Родина» ВАТ «Криворізький залізорудний комбінат») Елементи, в яких виконувалася умова

$$\sigma_e \geq R_c, \quad (1)$$

вважалися зруйнованими. При цьому несуча здатність зразка знижувалася, що враховувалося коефіцієнтом зниження міцності по відношенню до початкової міцності:

$$\omega = \frac{n - n_p}{n},$$

де n – загальне число кінцевих елементів; n_p – число зруйнованих кінцевих елементів, в яких виконалася умова (1). Величина коефіцієнта зниження міцності змінювалася в наступних межах

$$1 > \omega > \omega_{зал},$$

де $\omega_{зал}$ – залишкова міцність зразка.

На рис. 4-6 показані в безрозмірних координатах модельовані гірські породи шахти «Родина» ВАТ «Криворізький залізорудний комбінат» для випадків нормального і логнормального законів розподілу як таких, що найближче відбивають їх структурні особливості. З графіків виходить, що до реальної

кривої деформування найближче розташовані імітаційні криві, отримані на підставі логнормального закону розподілу.

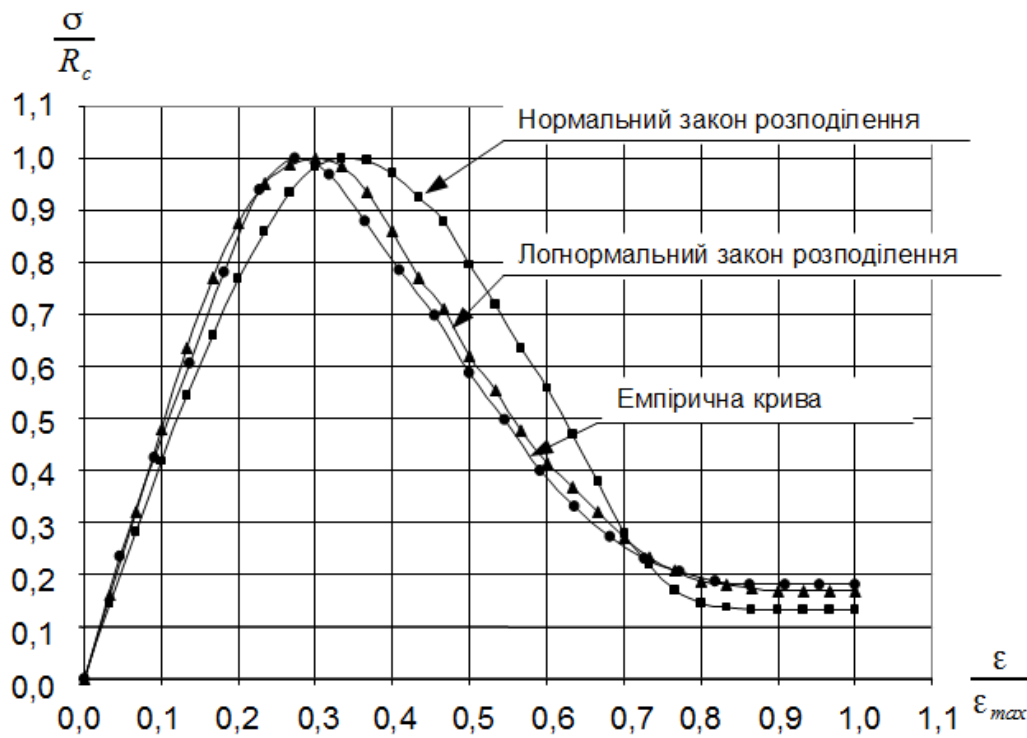


Рис. 4 – Криві деформування за межею міцності кварцево-гідрогематитобіотитових сланців

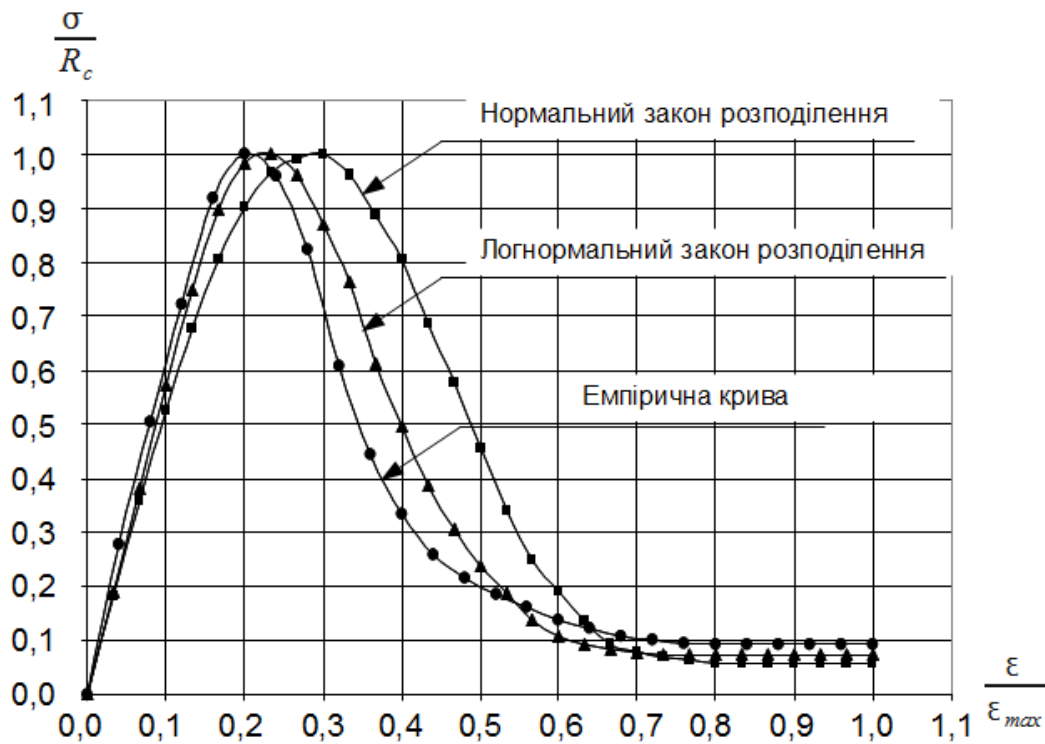


Рис. 5 – Криві деформування за межею міцності мартито-кварцито-гематитових роговиків



Рис. 6 – Криві деформування за межу міцності руди краско-мартитової

Для порівняння з результатами чисельного моделювання криві лабораторних випробувань гірських порід були приведені до безрозмірної форми. Як випливає з рис. 4-6 і таблиці 1, відмінність натурних і чисельних експериментів не перевищує 12%, що є цілком задовільним.

Таблиця 1 – Порівняння результатів чисельного моделювання і лабораторних тестів

Відносна деформація	Діапазон відносного напруження								
	к-г.б. сланець			к.м.руда			м.-к.г. роговик		
	Тест	модель	%	Тест	модель	%	Тест	модель	%
0,1	0,42	0,46	9,5	0,40	0,41	2,5	0,60	0,58	3,3
0,2	0,78	0,86	11,2	0,80	0,81	1,5	1,0	0,98	2,0
0,3	0,98	1,00	2,0	1,00	1,0	0	0,70	0,76	8,67
0,4	0,78	0,87	11,5	0,90	0,92	2,2	0,36	0,40	12,2
0,5	0,59	0,62	5,0	0,57	0,62	8,1	0,20	0,22	10,0
0,6	0,40	0,42	5,0	0,39	0,43	8,1	0,12	0,10	12,2
0,7	0,26	0,27	3,8	0,20	0,27	10,2	0,11	0,09	9,2
0,8	0,09	0,1	10,0	0,13	0,41	7,8	0,10	0,095	5,3
0,9	0,087	0,1	12,0	0,11	0,12	7,6	0,95	0,095	0,0
1,0	0,085	0,1	12,0	0,10	0,11	7,4	0,95	0,095	0,0

Викладена вище методика отримання кривих деформування гірських порід за межею міцності на основі відомих параметрів логнормального закону розподілу була реалізована в програмному продукті, що розвивається на кафедрі будівництва і геомеханіки НГУ, блок-схема якого наведена на рис. 7.

З використанням модифікованого програмного продукту була вирішена тестова задача про напружено-деформований стан порідного масиву, що пружно-пластично деформується навколо гірничої одиночної круглої виробки.

Початкові дані для розрахунку були взяті з роботи [5]. Результати розрахунків величини радіусу зони непружних деформацій і зміщень контуру виробки, виконаних за методикою, наведеною в [11], і за пропонованою методикою порівняно з результатами аналітичного рішення, наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Порівняння результатів розрахунків

Варіанти розрахунку	Тестове рішення	За методикою, наведеною в [11]	За пропонованою методикою
$r_L = \frac{R_L}{R_0}$	2,9	2,53	2,68
% % відхилення	0	12,8	7,6
U_0 , м	0,28	0,16	0,18
%, % відхилення	0	42,2	35,7

З таблиці виходить, що запропонований алгоритм розрахунку дає вищу точність і може бути рекомендований для подальших досліджень. В той же час, в подальших дослідженнях слід приділити увагу вдосконаленню алгоритму розрахунку в частині визначення зміщень, оскільки і методика, яка наведена в [11], і запропонований алгоритм все ще дають велику похибку при визначенні зміщень контуру виробки. В зв'язку з цим рекомендується для умов, що збігаються з умовами на шахті «Родина» величину зміщення контуру виробки, яка визначена в ході чисельного експерименту, множити на поправочний коефіцієнт $k=1,35$. Ця обставина врахована в алгоритмі вирішення задач пружнопластичності про розподіл напружень і деформацій навколо протяжних виробок в складноструктурному рудному масиві, на підставі яких були розроблені заходи підвищення стійкості виробок для умов шахти «Родина» ВАТ «Криворізький залізорудний комбінат».

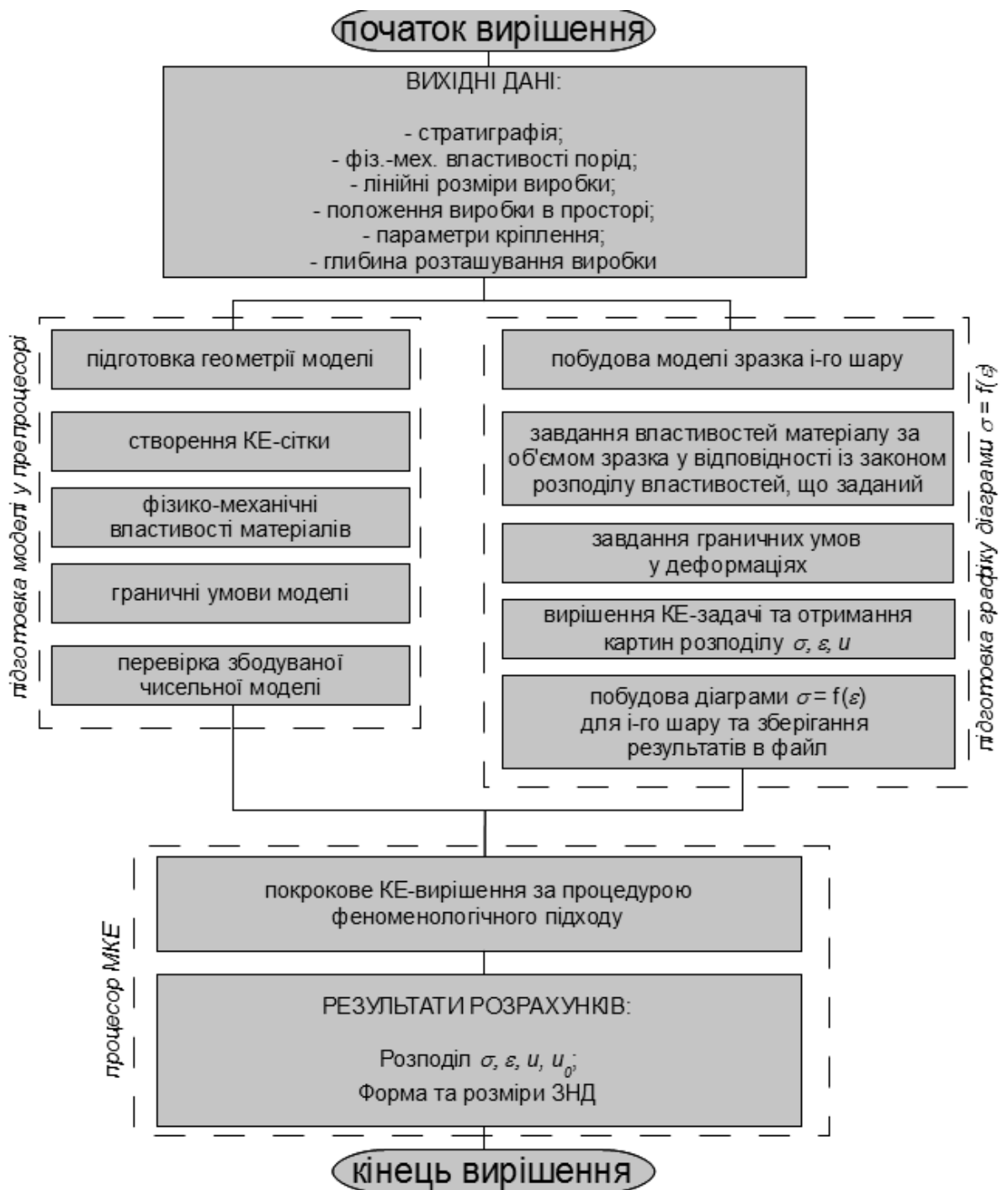


Рис. 7 – Блок-схема структури програмного продукту з додатковим модулем побудови діаграм « $\sigma - \varepsilon$ »

Висновки. 1. Виконані лабораторні випробування основних вміщуючих порід і руди, відібрані у виробках шахти «Родина» ВАТ «Криворізький залізорудний комбінат», що дозволило отримати гістограми розподілу межі міцності на одновісне стискування і графіки деформування гірських порід за межею міцності.

2. Виконано імітаційне чисельне моделювання процесу деформації гірських порід за межею міцності, що дозволило отримати віртуальні графіки поза межної деформації.

3. Розроблений модуль алгоритму розрахунку в програмному продукті, який дозволив підвищити точність геомеханічних розрахунків.

4. Виконані тестові розрахунки, які показали хорошу збіжність результатів використання запропонованого алгоритму в частині визначення розмірів зони непружних деформацій і краці, але все ще недостатньо, результати визначення величин зміщень контуру виробки. В зв'язку з цим в алгоритм розрахунку при визначенні переміщень запропоновано вводити поправочний коефіцієнт $k=1,35$. Зазначена величина цього коефіцієнта дійсна для умов, що близькі до умов шахти «Родина» ВАТ «Криворізький залізрудний комбінат».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Фадеев А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике / Фадеев А. Б. – М.: Недра, 1987. – 236 с.
2. Ставрогин А.Н. Пластичность горных пород / А.Н. Ставрогин, А.Г. Протосеня. – М.: Недра, 1979. – 301 с.
3. Виноградов В.В. Геомеханическое управление состоянием массива вблизи горных выработок / Виноградов В.В. – К.: Наукова думка, 1989. – 192с.
4. Кирничанский Г.Т. Элементы теории деформирования и разрушения горных пород / Кирничанский Г.Т. – К.: Наукова думка, 1989. – 189 с.
5. Шашенко А.Н. Некоторые задачи статистической геомеханики / А.Н. Шашенко, С.Б. Тулуб, Е.А. Сдвижкава. – К.: Пульсары, 2002. – 302 с.
6. Hilton E. Finite element programming / E. Hilton, D.R.J. Owen. – London: Academic Press, 1977. – 305 p.
7. Шашенко А.Н. Упругопластическое состояние породного массива, дилатирующего в окрестности подземной выработки / А.Н. Шашенко, А.В. Солодянкин // Геотехническая механика. – 2005. – №61. – С. 230-241.
8. Шашенко А.Н. Математическая модель процесса потери упругопластической устойчивости породного массива в окрестности одиночной выработки / А.Н. Шашенко, С.Н. Гапеев // Гірничо-видобувна промисловість України і Польщі: актуальні проблеми і перспективи: Українсько-Польський форум гірників: матеріали конференції / Нац. гірнич. ун-т. – Д., 2004. – С.75-80.
9. Шашенко А.Н. Подход к моделированию возмущенного процесса при исследовании потери упругопластической устойчивости почвы одиночной выработки / А.Н. Шашенко, С.Н. Гапеев // Современные проблемы шахтного и подземного строительства: Материалы междунар. науч.-практич. симпоз.: материалы. – Донецк: Норд-пресс, 2004. – Вып. 5. – С. 56-63.
10. Шашенко А.Н. Масштабный эффект в горных породах: монография / А.Н. Шашенко, Е.А. Сдвижкова, С.В. Кужель. – Д.: Арт-Пресс, 2004. – 132 с.
11. Шашенко О.М. Деформованість та міцність масивів гірських порід: монографія / О.М. Шашенко, О.О. Сдвижкова, С.М. Гапеев – Д.: Національний гірничий університет, 2008. – 224 с.