

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
«НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**



**ГАПЄЄВ Сергій Миколайович**

**УДК 622.831**

**МОДЕЛЮВАННЯ І ПРОГНОЗ ГЕОМЕХАНІЧНИХ  
ПРОЦЕСІВ У ВИРОБКАХ ГЛИБОКИХ ШАХТ**

**Спеціальність: 05.15.09 – геотехнічна і гірничча механіка**

**Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук**

**Дніпропетровськ – 2014**

## Дисертація є рукописом.

Робота виконана на кафедрі будівництва, геотехніки і геомеханіки Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України (м. Дніпропетровськ).

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор  
**Шашенко Олександр Миколайович,**  
завідувач кафедри будівництва, геотехніки і геомеханіки Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України (м. Дніпропетровськ).

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Кравець Віктор Георгійович,**  
завідувач кафедри геобудівництва і гірничих технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України;

доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник  
**Паламарчук Тетяна Андріївна,**  
провідний науковий співробітник відділу механіки гірських порід Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (м. Дніпропетровськ);

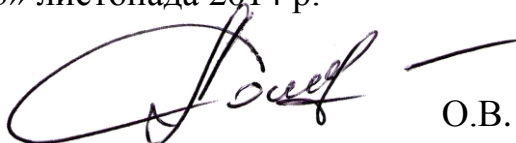
доктор технічних наук, професор  
**Петренко Володимир Дмитрович,**  
завідувач кафедри тунелів, основ та фундаментів Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна Міністерства освіти і науки України.

Захист відбудеться «04» грудня 2014 р. о 12.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.04 у Державному ВНЗ «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Державного ВНЗ «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України.

Автореферат розісланий «03» листопада 2014 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



О.В. Солодянкін

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність проблеми.** Освоєння підземного простору, пов'язане з видобутком корисних копалин, в найближчому столітті відбуватиметься на глибинах, що наближаються до 2000 метрів. Зростаючий рівень напружень і температури в породних масивах, зміна структури гірських порід на великих глибинах спричинятимуть загострення геомеханічних проблем, пов'язаних із забезпеченням стійкості виробок і безпекою працюючих. Досить імовірно, активізуються динамічні прояви гірського тиску, такі як гірські удари, раптові викиди вугілля, породи і газу. Активізуються і великі статичні деформації, які проявляються у вигляді здимання порід підосви, вивалів з боку порід покрівлі, деформацій контуру гірничих виробок.

Прояви великих деформацій, як динамічних, так і статичних, будуть вимагати розробки надійних способів прогнозу цих явищ для забезпечення, насамперед, безпеки працюючих в шахті людей. У свою чергу розробка надійних способів прогнозу передбачає створення відповідних геомеханічних моделей, що враховують специфіку поведінки високонапружених газонасичених порід на великих глибинах. Очевидно, що теоретичні моделі, які використовувалися для дослідження описуваних процесів і прогнозу стану геомеханічної системи «протяжна виробка - породний масив» на менших глибинах, повинні удосконалюватися і адекватно відображати особливості поведінки породного масиву в оголеннях при змінній геомеханічній ситуації.

У зв'язку з цим прогноз і забезпечення стійкості виробок глибоких шахт, розташованих в структурно-неоднорідному породному масиві, на основі застосування ефективних способів управління геомеханічними процесами в приконтурному породному масиві, що вимагає обґрунтування відповідних рішень, критеріїв, раціональної області застосування тих чи інших способів підтримки виробок, є актуальною науково-технічною проблемою, вирішенню якої присвячена дисертація.

**Зв'язок роботи з науковими проблемами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалася відповідно до тематичного плану держбюджетних НДР НГУ: ГП-257 (№ держреєстрації 0100U001824), ГП-274 (№ держреєстрації 0100U001792), ГП-290 (№ держреєстрації 0102U003022), ГП-321 (№ держреєстрації 0103U003022), ГП-338 (№ держреєстрації 0104U000780), ГП-366 (№ держреєстрації 0105U000519), ГП-410 (№ держреєстрації 0108U000541) – відповідно до пріоритетного напрямку розвитку науки і техніки України «Новітні та ресурсозберігаючі технології в енергетиці», а також в рамках комплексної галузевої програми РН.Ц.001 «Удосконалення технічної бази паливно-енергетичного комплексу та підвищення ефективності використання енергоресурсів», в рамках госпдоговірних НДР ХТ-050373 (№ держреєстрації 0104U008962), ХТ-050376 (№ держреєстрації 0107U010270), ХТ-050379 (№ держреєстрації 0110U001280), ХТ-050382 (2010 р.), ХТ-041013 (2011 р.), ХТ-041015 (2012 р.).

**Метою роботи** є удосконалення методів чисельного моделювання геомеханічних процесів, що розвиваються навколо виробок глибоких шахт, розташо-

ваних в структурно-неоднорідному породному масиві, і обґрунтування параметрів способів забезпечення їх стійкості.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані та вирішені наступні **основні задачі досліджень**:

- аналіз існуючих уявлень, розробок і виробничого досвіду з проблеми моделювання та прогнозу геомеханічних процесів в підземних виробках;

- дослідження впливу мінливості відстані між тріщинами на варіацію міцності структурних елементів породного середовища та розробка методики оцінки структурного послаблення породного середовища на основі імовірнісної моделі, що враховує випадкову відстань між існуючими дефектами (тріщинами);

- дослідження впливу параметрів геологічної будови та початкового напружено-деформованого стану породного середовища, ослабленого гірничою виробкою, на характер розвитку квазістатичного процесу втрати пружнопластичної стійкості порід підшоши в ній;

- аналіз характеру розвитку геомеханічних процесів на основі результатів шахтних спостережень, виконаних у різних гірничо-геологічних і гірничотехнічних умовах експлуатації протяжних виробок, для обґрунтування розрахункових схем і чисельних моделей з оцінки напружено-деформованого стану геомеханічних систем «виробка-кріплення-масив»;

- розробка підходу до вирішення нелінійних геомеханічних задач структурного аналізу, що дозволяє враховувати не тільки ефект розміцнення середовища навколо гірничої виробки, але й ефект розпушення, для отримання рішень, адекватних як в частині напружень, так і в частині переміщень;

- удосконалення існуючої процедури імітаційного чисельного моделювання процесу здимання порід підшоши;

- розробка процедури отримання на численних моделях з достатньою для чисельного моделювання точністю повних діаграм позамежного деформування гірських порід;

- розробка алгоритму для чисельної оцінки напружено-деформованого стану складноструктурного породного масиву, що містить гірничі виробки, і на його основі розробка комплексної методики оцінки напружено-деформованого стану геомеханічної системи «породний масив-виробка»;

- обґрунтування на основі комплексної методики параметрів способів забезпечення стійкості протяжних виробок для різних гірничо-геологічних умов відпрацювання родовищ твердих корисних копалин України.

**Об'єкт досліджень** – геомеханічні процеси в структурно-неоднорідному породному масиві навколо виробок глибоких шахт.

**Предмет досліджень** – напружено-деформований стан геомеханічної системи «виробка-структурно неоднорідний породний масив».

**Ідея роботи** полягає у використанні адекватних геомеханічних моделей при виконанні прогнозу та обґрунтуванні параметрів способів забезпечення стійкості протяжних виробок глибоких шахт, розташованих в неоднорідному породному масиві.

**Методи досліджень.** Методичну основу досліджень складає комплексний підхід, що включає аналіз і узагальнення літературних джерел, науково-технічних досягнень і виробничого досвіду з тематики досліджень, натурні інструментальні спостереження, лабораторні дослідження, виконані із залученням методу фізичного моделювання на еквівалентних матеріалах, аналітичні дослідження із залученням методів будівельної механіки, механіки деформованого твердого тіла, теорій пружності, пластичності і стійкості систем, що деформуються, теорії ймовірностей і математичної статистики, чисельних методів.

**Наукові положення і результати, що захищаються:**

1. Відмінність міцності породного масиву від міцності лабораторних зразків визначається варіацією відстані між тріщинами в межах 50-52% відповідно до закону Релея, експоненційно знижується в залежності від цього параметра, що дозволяє підвищити точність оцінки опірності порід і надійність проектування виробок.

2. При «жорсткому» навантаженні приконтурного масиву переміщення довільної точки, що знаходиться на відстані  $r$  від межі зони непружних деформацій  $r_L$ , визначаються інтегруванням з урахуванням спадкової пам'яті про рівень руйнування структурних зв'язків на інтервалі « $r_L - r$ », що дозволяє на основі такої деформаційної моделі більш точно визначати переміщення контуру виробки і прогнозувати її стійкість.

3. Пружнопластичний стан високонавантаженої геомеханічної системи, що містить протяжну виробку та складається з неоднорідного породного середовища, властивості якого підпорядковуються логнормальному закону розподілу, деформується в режимі заданих деформацій аналогічно руйнуванню породного зразка на «жорсткому» пресі, при цьому верхня гілка повної діаграми деформування є відповідальною за формування зовнішніх розмірів ЗНД, а нижня – за переміщення на контурі виробки, що дозволяє досить точно прогнозувати і забезпечувати стійкість гірничих виробок.

**Наукова новизна одержаних результатів досліджень.**

1. Вперше запропонована методика визначення коефіцієнта структурного ослаблення породного середовища з урахуванням мінливості відстані між тріщинами, заснованого на використанні розподілу Релея як ймовірнісної моделі випадкової відстані між тріщинами.

2. Запропонований підхід до вирішення нелінійних геомеханічних задач структурного аналізу, що враховує, на відміну від відомих, не тільки ефект зміцнення середовища навколо гірничої виробки, але і його розпушення, що дозволяє отримувати рішення таких задач, досить адекватні не тільки в частині результатів за напруженнями, але і в частині переміщень.

3. Удосконалена процедура імітаційного моделювання явища здимання порід підосви протяжної виробки, що дозволяє врахувати етапи історії розвитку переміщень у виробці. Процедура розглядає напружено-деформований стан, що формується під час розвитку здимання, як додатковий до НДС, отриманого на етапі пружнопластичного вирішення геомеханічної задачі. В основу процедури імітаційного моделювання покладено уявлення про здимання як про втра-

ту пружнопластичної стійкості геомеханічної системи «виробка-породний масив».

4. Розроблена процедура отримання на чисельних моделях повних діаграм поза межного деформування зразків гірських порід. Дана методика є удосконаленням відомого алгоритму імітаційного моделювання випробувань зразків і дозволяє отримувати повні діаграми з достатньою для чисельного моделювання точністю.

5. Розроблений алгоритм, який об'єднує в собі підходи пружнопластичного рішення з урахуванням розміщення і розпушення, імітаційного моделювання здимання, отримання кривих поза межного деформування на чисельних моделях, адекватність якого доведена вирішенням тестової задачі і порівнянням її результатів з точним аналітичним рішенням – відхилення в частині напружень склало 0,4%; відхилення в частині переміщень склало 7,86%.

6. Розроблена комплексна методика оцінки напружено-деформованого стану геомеханічної системи «породний масив-виробка», що відрізняється від відомих тим, що вперше прогнозовані переміщення в алгоритмі розрахунку визначаються на основі адекватної моделі руйнування гірських порід, яка враховує наявність нижньої гілки на діаграмі випробування породних зразків в режимі заданих деформацій.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій** підтверджується достатнім обсягом та результатами шахтних і лабораторних досліджень, коректністю поставлених задач, застосуванням апробованих методів механіки суцільного середовища, статистики та теорії ймовірностей, задовільною (до 20%) збіжністю результатів аналітичних і натурних досліджень, адекватністю розроблених математичних і фізичних моделей, позитивними результатами реалізації розроблених способів і методик у виробничих умовах.

**Наукове значення роботи** полягає у встановленні нових закономірностей розвитку геомеханічних процесів, що супроводжують деформування і руйнування породного масиву навколо гірничих виробок глибоких шахт, обґрунтуванні на їх основі методологічних підходів до створення адекватних моделей геомеханічних систем «виробка-масив-кріплення» та розробці ефективних способів забезпечення стійкості гірничих виробок глибоких шахт.

**Практичне значення роботи** полягає:

- у розробці методики визначення коефіцієнта структурного ослаблення породного середовища з урахуванням мінливості відстані між дефектами (тріщинами) в структурних елементах;
- в удосконаленні методики імітаційного моделювання здимання порід під дошви, що враховує історію розвитку процесу;
- в удосконаленні процедури отримання на чисельних моделях повних діаграм поза межного деформування зразків гірських порід;
- у розробці комплексної методики оцінки напружено-деформованого стану геомеханічної системи «породний масив-виробка», заснованої на адекватній моделі руйнування гірських порід, що враховує повну діаграму деформування гірських порід за межею міцності;

– у розробці методики визначення раціональних параметрів способу забезпечення тривалої стійкості сполучень основних відкатних та вентиляційних виробок і рекомендацій щодо підвищення їх стійкості на шахтах ДП «Макіїввугілля»;

– у розробці методики підготовки і проведення польових і лабораторних досліджень з прогнозування властивостей гірських порід в умовах ВАТ «ДТЕК ШАХТА «КОМСОМОЛЕЦЬ ДОНБАСУ»;

– у розробці рекомендацій щодо підвищення стійкості підготовчих виробок, що експлуатуються на глибоких горизонтах шахти «Шахтарська-Глибока» ДП «Шахтарськантрацит»;

– у розробці методики оцінки напружено-деформованого стану складноструктурного вуглепородного масиву для умов шахт ДП «Антрацит»;

– у розробці методики стійкості підземних виробок на рудниках Кривбасу.

**Реалізація висновків і рекомендацій роботи.** Реалізація розроблених у дисертації рішень здійснена на шахті «Шахтарська-Глибока» ДП «Шахтарськантрацит» при будівництві 1-го східного конвеєрного штреку пласта  $h_8$  уклонного поля центрального блоку (УП ЦБ) з очікуваним економічним ефектом 23,3 тис. грн. на 1000 п.м.; на шахті «Комсомольська» ДП «Антрацит» при забезпеченні стійкості 16 західного конв. штреку пласта  $h_{10}$  з очікуваним економічним ефектом понад 120 тис. грн. на 1000 п.м.; при оцінці стійкості геомеханічної системи «капітальна виробка-рудний масив» на шахті «Родина» ВАТ «Криворізький ЗРК» з очікуваним економічним ефектом 260 тис. грн. на 1000 п.м.; при виконанні науково-дослідних робіт для ПАТ «ДТЕК ШАХТА «КОМСОМОЛЕЦЬ ДОНБАСУ», шахт ДП «Макіїввугілля», шахти «СТЕПОВА» ПАТ «ДТЕК ПАВЛОГРАДВУГІЛЛЯ», шахти «ДОБРОПІЛЬСЬКА» ВАТ «ДТЕК ДОБРОПІЛЛЯВУГІЛЛЯ»; у навчальному процесі Державного ВНЗ «Національний гірничий університет» при підготовці спеціалістів та магістрів за спеціальністю «Будівництво шахт і підземних споруд» і в науковій діяльності, включаючи підготовку аспірантів.

**Особистий внесок автора.** Автором самостійно сформульована наукова проблема, ідея і мета роботи; поставлені задачі досліджень; обрані методи досліджень; виконаний аналіз літературних джерел і виробничого досвіду з проблеми, що розглядається в дисертації; розроблені або вдосконалені методики і програми виконання натурних та лабораторних досліджень, математичні моделі та підходи до чисельного моделювання, що використані в ході вирішення поставлених у роботі задач; наукові положення, висновки і рекомендації. Автор брав безпосередню участь у проведенні натурних шахтних спостережень, виконанні лабораторних досліджень і чисельному моделюванні; у розробці технічних рішень і впровадженні результатів досліджень у виробництво.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення, результати і зміст роботи доповідалися на міжнародних науково-технічних конференціях «Форум гірників» (м. Дніпропетровськ, НГУ, 2005, 2007, 2009-2011, 2013 рр.), «Проблеми підземного будівництва та напрямки розвитку тампонажу та закріплення гірських порід» (м. Антрацит, АФГТ СНУ ім. В.Даля, 2006 р.), «Проблеми гео-

механіки та механіки підземних споруд» (РФ, м. Тула, ТулГУ, 2006 р.); «Тиждень гірника» (РФ, м. Москва, 2009 р.), «Новіната за напредналі наука-2012» (Болгарія, м. Софія, 2012 р.), науково-практичній конференції «Інноваційні технології та проекти в гірничо-металургійному комплексі, їх науковий і кадровий супровід» (Казахстан, м. Алмати, КазНТУ, 2014 р.), міжнародному науково-практичному симпозиумі «Сучасні проблеми шахтного і підземного будівництва» (м. Донецьк, 2004, 2006 рр.), міжнародному симпозиумі «Mining planning and equipment selection (MPES 2008)» (Китай, м. Бейонг, 2008 р.), міжнародних науково-технічних конференціях молодих вчених, аспірантів та студентів «Удосконалення технології будівництва шахт і підземних споруд» (м. Донецьк, ДонНТУ, 2005-2011 рр.).

**Публікації.** Основні положення дисертаційної роботи викладені в 59 наукових працях, зокрема в 1 монографії, 2 розділах монографій, 33 статтях, опублікованих у спеціалізованих наукових виданнях, затверджених ВАК України, і в зарубіжних наукових періодичних виданнях (з яких 5 статей включені до міжнародних наукометричних баз), і 23 статтях, опублікованих у збірках матеріалів конференцій та інших виданнях.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел з 308 найменувань на 32 сторінках і 17 додатків на 24 сторінках. Містить 272 сторінки машинописного тексту, в тому числі 93 рисунка і 11 таблиць. Загальний обсяг роботи становить 335 сторінок.

## ОСНОВИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Розвиток суспільства вимагає все зростаючого споживання мінеральних ресурсів. Відомі родовища, що залягають у приповерхневому шарі Землі, вже відпрацьовані, і подальший видобуток корисних копалин відбуватиметься на більших глибинах, які вже зараз перевищують 1000 м. У найближчі роки ця тенденція збережеться і глибина розробки, що дорівнює 2000 м, буде вважатися середньою.

Проблеми світового рівня в період глобалізації суспільних процесів, пов'язані з освоєнням підземного простору, можна структурувати наступним чином: організаційні, фінансові та геомеханічні. Перші дві проблеми вирішуються досить просто і швидко як в національному, так і в міжнародному правовому полі в тому випадку, коли на якомусь відрізьку часу сукупність причин, насамперед економічних, досягає деякого критичного рівня, змушуючи приймати якісно нові політичні та інженерні рішення. Для вирішення геомеханічних проблем потрібно вдосконалення існуючих та розробка нових методів і підходів до прогнозування стану неоднорідного породного середовища, що включає гірничі об'єкти, та обґрунтування параметрів способів, що забезпечують їх стійкість.

Зростаючий рівень гірського тиску, температури і порушеності породного масиву неминуче призведуть до ускладнення процесів ведення підземних робіт, зниження безпеки працюючих та збільшенню витрат на видобуток корисних копалин. У цих умовах організація та фінансування гірничих робіт, що забезпе-



чують їх ефективність і безпеку, неминуче стикаються з прогнозом геомеханічних явищ, що відбуваються в глибині надр при утворенні штучних порожнин, ефективність якого багато в чому залежить від того, наскільки досконаліми є фізичні та математичні моделі, які їх описують.

Таким чином, прогноз і забезпечення стійкості виробок глибоких шахт, розташованих в структурно-неоднорідному породному масиві, на основі застосування ефективних способів управління геомеханічними процесами в породному масиві навколо виробки, обґрунтування відповідних фізичних і математичних моделей, критеріїв, раціональної області застосування тих чи інших способів підтримки виробок є актуальною науково-технічною проблемою.

Питаннями забезпечення стійкості гірничих виробок в складних умовах та прогнозування її стану займалися багато вчених та наукових колективів. В Україні найбільший внесок до вирішення цієї проблеми внесли роботи Бабіюка Г.В., Бондаренка В.І., Виноградова В.В., Глушка В.Т., Дружка Є.Б., Друцка В.П., Заславського Ю.З., Зоріна А.М., Зборщика М.П., Касьяна М.М., Коскова І.Г., Кошелева К.В., Кравця В.Г., Литвинського Г.Г., Максимова О.П., Назимка В.В., Новикової Л.В., Паламарчук Т.А., Парчевського Л.Я., Петренка В.Д., Пінковського Г.С., Роєнка А.М., Сдвіжкової О.О., Усаченка Б.М., Халимендика Ю.М., Шашенка О.М. і багатьох інших. Проте, не дивлячись на значні досягнення, враховуючи високу складність об'єкту досліджень, його масштаби та специфіку, а також постійне ускладнення умов, актуальність цієї проблеми не знижується й сьогодні.

Найбільш характерними і все більш масовими в умовах великих глибин розробки є прояви гірського тиску, пов'язані з великими деформаціями: статичними і динамічними. Перші пов'язані зі здимання порід підшви у виробках, другі – з раптовими викидами вугілля, породи, газу. Насамперед, з цими проявами гірського тиску пов'язана більшість проблем, що впливають на ефективність і безпеку гірничих робіт. У цьому зв'язку поняття «великі глибини розробки» втрачає сенс оцінки лише фізичного розташування досліджуваного об'єкту у просторі, а стає комплексним показником, за яким можна оцінювати умови будівництва та експлуатації виробок, як це показано, наприклад, в роботах О.В. Солодянкін. В дисертації для умов нелінійного поведіння породного середовища за межею міцності при випробуваннях на стиск (тобто за наявності спадаючої гілки повної діаграми деформування « $\sigma - \varepsilon$ ») отриманий вираз для визначення «критичної глибини» ведення гірничих робіт ( $H^*$ ), за яким умови проведення та експлуатації виробки можна відносити до «великих глибин»:

$$H^* = \frac{2\bar{R}_c \bar{k}_c \bar{k}_w}{\gamma} \left[ \frac{(1 + \varepsilon_v^{-0.4})^2 \ln(1 + \varepsilon_v^{-0.4})}{(1 + \varepsilon_v^{-0.4})^2 - 1} \right]^2,$$

де  $\bar{R}_c$  – усереднена межа міцності порід на одновісний стиск;  $\bar{k}_c$  – усереднений коефіцієнт структурно-механічного послаблення;  $\bar{k}_w$  – усереднений коефіцієнт

обводненості гірських порід;  $\gamma$  – об’ємна вага гірських порід;  $\varepsilon_v$  – середня величина об’ємного розпушення гірських порід.

Дослідження в дисертації були виконані стосовно до гірничо-геологічних умов глибоких вугільних шахт Донбасу та рудників Кривого Рогу. На рис. 1 наведена в загальному вигляді структура геомеханічної моделі щодо вивчення напружено-деформованого стану породного масиву, послабленого одиночною виробкою, розташованою поза зоною впливу очисних робіт. Ця модель складається з *моделі породного середовища*, яка може бути детермінованою або стохастичною. На її основі отримують вихідні фізико-механічні характеристики: міцнісні, деформаційні, реологічні. *Геометрична модель* дозволяє побудувати розрахункову схему, яка відображатиме геологічну структуру масиву і конфігурацію виробок, що послаблюють цей масив. *Фізична модель руйнування* дозволяє отримати співвідношення напружень, при яких починається розвиватися процес деструкції неоднорідних з точки зору деформованості гірських порід. У сукупності з граничними і початковими умовами три розглянуті моделі дозволяють вирішувати 3D або 2D геомеханічну задачу в пружній, пружно-пластичній або пружно-пластично-в'язкій постановці з втратою або без втрати стійкості. В результаті дослідження такої моделі отримують необхідні дані для аналізу: поля напружень та деформацій, переміщення і розміри зони зруйнованих порід.

При обґрунтуванні *моделі породного середовища* істотним є перехід від фізико-механічних характеристик, одержуваних на лабораторних зразках, до опису породного масиву, який має набагато більші розміри. У геомеханіці ця задача отримала назву «масштабний ефект в гірських породах». Її вирішенню присвячені роботи багатьох вчених, які розглядали природу масштабного ефекту із різних точок зору. Однією з гіпотез, що вперше була сформульована в роботах А.П. Александрова та С.І. Журкова та отримала розвиток в роботах багатьох вчених, зокрема В. Вейбула, Т.А. Канторової, Я.І. Френкеля, С.Д. Волкова, Л.Г. Седракіяна, Б.М. Струніна, М.М. Протод'яконова, М.І. Койфмана, С.Б. Чиркова, М.В. Раца, Г.П. Фісенка, Д.М. Кіма, Г.Т. Рубця, Ю.І. Мартинова, В.Т. Глушка, Г.Я. Парчевського, О.М. Шашенка, О.О. Сдвижкової та інших.

Відмінність міцності масиву від міцності структурних елементів оцінюється в геомеханіці коефіцієнтом структурного ослаблення  $k_c = (R_m)/(R_c)$ , де  $R_m$  – міцність порід в масиві. Оскільки з цією характеристикою пов'язаний рівень граничних напружень і параметри пружнопластичного стану породного масиву навколо виробок, то встановлення об'єктивного значення коефіцієнта структурного ослаблення являє собою важливу і складну задачу, пов'язану з раціональним проектуванням підземних споруд. Визначенню цієї величини присвячено велика кількість робіт, заснованих на статистичному поясненні природи міцності твердих тіл. Отримано залежності різного ступеня складності, що відображають якісну картину зниження міцності зразків великого розміру. Але остаточно кількісна оцінка ступеня зниження міцності є дуже складною, зважаючи на відмінності вихідних ідеалізованих фізичних моделей від реальних масивів гірських порід.



Рис. 1. Загальна структура геомеханічної моделі одиночної підземної виробки

В роботах О.М. Шашенка і О.О. Сдвіжкової на основі статистичної теорії міцності породний масив розглядається як агрегат, що складається із структурних елементів, фізико-механічні властивості яких розподілені випадковим чином за деяким законом розподілу зі щільністю розподілу  $f(R)$  і інтегральною функцією  $F(R)$ . При цьому міцність масиву повинна оцінюватися такою величиною  $R_m$ , щоб міцність його структурних елементів (лабораторних зразків) із заданою надійністю була не меншою цього значення, тобто, вірогідність такої події буде визначатися як:

$$p(R \geq R_m) = 1 - F(R),$$

де  $F(R) = \int_{-\infty}^R f(x)dx$  – інтегральна функція розподілу випадкової величини  $R$ .

З рішення відповідної задачі випливає, що в найзагальнішому вигляді коефіцієнт структурного ослаблення може бути визначений за формулою:

$$k_c = \frac{\arg F(1-P)}{M(R)},$$

де  $\arg F(1-P)$  – аргумент функції  $F(R)$  при її значенні, що дорівнює  $1-P$ ;  $M(R)$  – математичне сподівання міцності структурних елементів;  $P$  – вірогідність.

При цьому дуже важливим є вигляд функції розподілу  $F(R)$  випадкової величини, якою в нашому випадку є межа міцності на одновісний стиск. У роботах О.М. Шашенка ця залежність була досліджена для випадку нормального закону розподілу, у роботах О.О.Сдвіжкової – для логнормального закону розподілу, який є більш загальним. При цьому в роботах О.М. Шашенка враховувалася та обставина, що природна тріщинуватість знижує міцність порід і змінює варіацію вибірки:

$$\eta' = \sqrt{\frac{l_m + l_0}{l_m} (\eta^2 + 1)} - 1,$$

де  $\eta'$  – відносна варіація міцності «виправленої» вибірки (тобто, вибірки, до якої умовно уведена деяка кількість зразків нульової міцності);  $\eta$  – варіація міцності звичайної вибірки;  $l_m$  – відстань між тріщинами в реальному породному середовищі;  $l_0$  – характерний розмір зразка, що випробовується на міцність в лабораторних умовах.

У роботах О.О. Сдвіжкової при оцінці варіації «виправленої» вибірки запропоновано враховувати, що міцність зразків, які містять макродефекти (тріщини), не знижується до нуля, а дещо зменшується відносно зразків звичайної вибірки. Тобто, до вибірки введені  $n_m$  порушених зразків, міцність яких дорівнює:

$$R_{i_m} = f(\alpha)R_i \quad (i = 1..n_m), \text{ де } f(\alpha) = 7 \cdot 10^{-4} \alpha^2 - 0,0386\alpha + 0,9359.$$

Тут  $R_{i_m}$  – міцність «порушених» зразків;  $R_i$  – міцність генеральної сукупності;  $f(\alpha)$  – функція зниження міцності зразків, яка залежить від кута нахилу тріщини  $\alpha$  до горизонтальної поверхні.

Виходячи з цього був отриманий вираз для оцінки відносної варіації «виправленої» вибірки

$$\eta' = \sqrt{\frac{K_2}{K_1^2} (\eta^2 + 1)} - 1; \quad K_k = \left( \frac{l_m}{l_0} + f^k(\alpha) \right) / \left( \frac{l_m}{l_0} + 1 \right), \quad (1)$$

де  $K_k$  – коефіцієнт впливу тріщини для моментів  $k$ -ого порядку статистичної вибірки.

У роботах О.О. Сдвіжкової було також показано, що найбільш прийнятною статистичною моделлю міцності структурних елементів породного масиву є логарифмічно нормальний закон розподілу та отриманий наступний вираз для оцінки коефіцієнту структурного ослаблення:

$$k_c = \frac{\exp(\arg F(1-P) \cdot \sqrt{\ln(\eta^2 + 1)})}{\sqrt{\eta^2 + 1}}. \quad (2)$$

Тут коефіцієнт  $k_c$  обчислюється через відносну варіацію міцності  $\eta$ , що відображає ступінь неоднорідності середовища на мікрорівні. Для врахування неоднорідності, зумовленої наявністю макродефектів (тріщин) до формули (2) слід увести «виправлену» варіацію  $\eta'$ , яка обчислюється з урахуванням формул (1).

У наведених вище дослідженнях вважалося, що відстань між тріщинами є величиною постійною, хоча насправді це не так, оскільки ця величина формувалася під впливом великого числа випадкових подій і сама є випадковою. В дисертації дослідження впливу масштабного ефекту були продовжені в припущенні, що відстань між тріщинами  $l_m$  – величина випадкова, котра підкорюється закону розподілу Релея. Цій закон розподілу був прийнятий після аналізу великої кількості даних про відстань між тріщинами у вміщуючих породах, які навів у своїх роботах С.А. Батугін. Розподіл Релея зручний тим, що він містить тільки один параметр масштабу – середньоквадратичне відхилення  $\sigma$ , який і визначає вигляд кривої розподілу. При цьому дослідження параметрів закону розподілу Релея показує, що при будь-якому значенні параметру  $\sigma$  випадкова величина (в нашому випадку – відстань між тріщинами) має розкид в межах 52%. Враховуючи вираз, що для цього закону пов'язує  $\sigma$  з математичним сподіванням  $m$ , а саме –  $\sigma(l) = 0,52m$ , граничне значення відстані між тріщинами буде виражатися наступною формулою:

$$l_m^* = 0,8m \sqrt{\ln \frac{1}{p^2}}. \quad (3)$$

Очевидно, що при прагненні ймовірності до одиниці граничне значення прагне до нуля, тому слід задатися деякою практичною достовірністю, з якою визначається розкид значень досліджуваної випадкової величини щодо її середнього значення.

З урахуванням викладеного, у формулі (1) для коефіцієнтів впливу тріщини слід замінити детерміновану величину  $l_m$  на випадкову величину  $l_m^*$ . Тоді остаточний вигляд стохастичною моделі міцності породного масиву, що дозволяє визначити варіацію міцності породного масиву при випадковій відстані між тріщинами, буде представлений системою рівностей (4). Тут  $K_1$  та  $K_2$  – коефіцієнти впливу тріщин для моментів першого та другого порядків відповідно.

$$\left\{ \begin{array}{l} k_c = \frac{\exp\left(\arg F(1-p) \cdot \sqrt{\ln(\eta'^2 + 1)}\right)}{\sqrt{\eta'^2 + 1}} \\ \eta' = \sqrt{\frac{K_2}{K_1^2}(\eta^2 + 1)} - 1, \\ K_1 = \frac{l_m^* + f(\alpha)}{l_0}, \quad K_2 = \frac{l_m^* + f^2(\alpha)}{l_0}, \\ l_m^* = 0,8m \sqrt{\ln \frac{1}{p^2}} \end{array} \right. \quad (4)$$

На рис. 2 показано порівняння різних гіпотез про міцність порушених тріщинами структурних елементів. Крива 2, побудована на припущенні про випадковий розподіл відстані між тріщинами, дає найбільш реалістичну оцінку мінливості міцності структурних елементів. В таблиці 1 показано порівняння отриманих залежностей з нормативними значеннями, що відображає цілком задовільну їх збіжність.

Таблиця 1

Коефіцієнт структурного ослаблення та розрахункова межа міцності

Середня відстань між тріщинами, $l_m$ , м	Коефіцієнт структурного ослаблення, $k_c$		Розрахункове значення міцності, $R_{розрах}$ , МПа	
	Запропонована методика	Норматив	Запропонована методика	Норматив
0,2	0,21	0,4	8,4	16
0,5	0,3	0,4	12,0	16

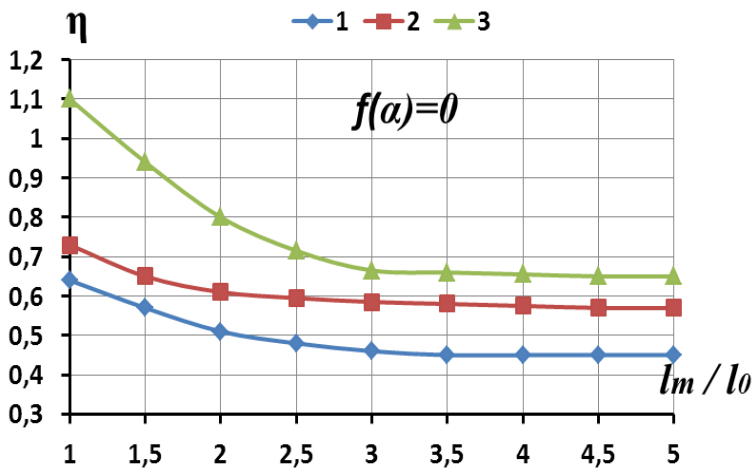


Рис. 2. Порівняння значень варіації для різних гіпотез про вплив макродефектів на мінливість міцності: 1 – гіпотеза про часткове збереження несучої здатності ( $f(\alpha)=0,3$ ); 2 – гіпотеза про часткове збереження несучої здатності ( $f(\alpha)=0,3$ ) и випадковій варіації відстані між тріщинами; 3 – гіпотеза про нульову міцність порушених елементів ( $f(\alpha)=0$ )

формі зривання порід підосви. Існує багато гіпотез, що пояснюють це явище. У дисертації в основу досліджень покладена біфуркаційна модель зривання, яка спочатку була розроблена О.М. Шашенком в припущенні гідростатичного початкового поля напружень і однорідного породного масиву навколо одиночної виробки. В крайньому випадку вважалася можливість горизонтального залягання породних шарів. У роботах О.В. Солодянкіна був отриманий критерій зривання для випадку негідростатичного початкового поля напружень, але його

На основі результатів викладених досліджень можна стверджувати, що відмінність міцності породного масиву від міцності лабораторних зразків визначається варіацією відстані між тріщинами в межах 50-52% відповідно до закону Релея, експоненційно знижується в залежності від цього параметра, що дозволяє підвищити точність оцінки опірності порід і надійність проектування виробок.

Вище зазначалося, що характерною особливістю проявів геомеханічних процесів у виробках глибокого закладення є наявність великих статичних деформацій їх контуру, які проявляються у

адекватність так і не була підкріплена достатньою кількістю натурних або лабораторних досліджень. Враховуючи складність виконання широкомасштабних натурних експериментів, в дисертації це завдання було вирішено шляхом випробувань фізичних моделей з еквівалентних матеріалів на модифікованій конструкції плоского випробувального стенду, що дозволяла створювати різні варіанти співвідношень вертикального і горизонтального навантаження, а також фізико-механічні параметрів модельованих порід і відповідних еквівалентних матеріалів.

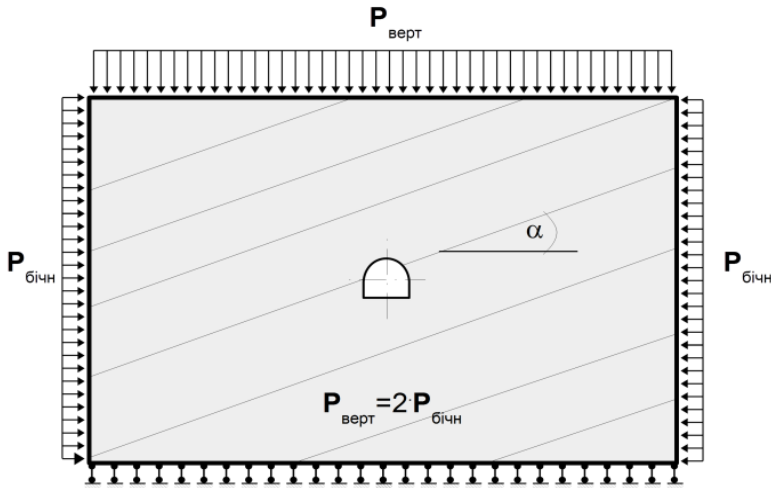


Рис. 3. Принципова схема навантаження лабораторної моделі

периментах деформація контуру виробки вимірювалася методом фотофіксації.

На рис. 3 показана принципова схема навантаження моделі, а в таблиці 2 – план-матриця проведення експериментів, де величина  $\lambda$  вказана в частках вертикального навантаження. Всього було виконано 28 серій випробувань, в кожній з яких було виконано по три підходи. Таким чином, загальна кількість випробуваних моделей, які увійшли у вибірку, склала 84 штуки. У всіх ек-

Таблиця 2

План-матриця експериментів на еквівалентних матеріалах  
(вплив параметрів  $\alpha$  та  $\lambda$  на прояви здиманні порід підоскви виробки)

Серія	Коэф-т бічного розпору $\lambda$	Нахил шарів, $\alpha$ , °	Серія	Коэф-т бічного розпору $\lambda$	Нахил шарів, $\alpha$ , °	Серія	Коэф-т бічного розпору $\lambda$	Нахил шарів, $\alpha$ , °
1	0,00	0,0	11	0,50	30,0	21	0,00	75,0
2	0,25		12	1,00		22	0,25	
3	0,50		13	0,00	23	0,50		
4	1,00		14	0,25	24	1,00		
5	0,00	15,0	15	0,50	45,0	25	0,00	90,0
6	0,25		16	1,00		26	0,25	
7	0,50		17	0,00	27	0,50		
8	1,00		18	0,25	28	1,00		
9	0,00	30,0	19	0,50	60,0			
10	0,25		20	1,00				

Аналіз поведінки шаруватих моделей показав розходження в характері їх деформування з боку підоскви. При переважному вертикальному навантаженні ділянки масиву моделі, прилеглі до виробки, в міру зростання навантаження зміщувалися в сторону виробки з відповідним спотворенням мірної сітки; в підосшві виробки формувалася тріщина, після появи якої виникав приріст швид-

кості переміщень і деформування моделі; виробка деформувалася в основному в бік зменшення висоти, горизонтальні переміщення були невеликі в порівнянні з вертикальною конвергенцією. У міру появи і зростання бічних навантажень, які прикладалися симетрично з обох сторін моделі, горизонтальні переміщення стінок виробки ставали близькими за величиною до вертикальних, а потім і перевищували їх. При цьому руйнування масиву в підшві виробки призводило до інтенсивного формування там області зруйнованих порід, що в результаті змінювало порожнину виробки від арочної форми до овалу, витягнутому вертикально.

Узагальнені результати моделювання наведені на рис. 4-6. Їх аналіз показав що кут нахилу  $\alpha$  шарів порід у моделі помітно впливає на величину і характер переміщень порід в підшві виробки при одній і тій же величині  $\lambda$  (відношення бічного навантаження до вертикального); максимальні переміщення і найбільша інтенсивність розвитку переміщень підшви має місце при куті нахилу шарів  $45^\circ$  незалежно від величини  $\lambda$ ; при  $\lambda = 0,75$  і  $1,0$  максимальні зміщення при будь-яких кутах нахилу шарів  $\alpha$  виявляються за величиною досить близькими (різниця не перевищує 7%), і при  $\lambda = 1,0$  і  $1,25$  - менше, ніж 5%. Отже, величина переміщень в підшві виробки нелінійно залежить від коефіцієнта бічного розпору  $\lambda$  і кута нахилу шарів порід, при тому для пластів з кутом падіння до 15 градусів при значеннях  $\lambda = 0,75 \div 1,25$  відрізняється в межах 7%, що дозволяє спрощувати без втрати точності розрахункові схеми геомеханічних задач для виробок, що знаходяться в таких умовах, беручи  $\lambda = 1$ , і отримувати адекватні рішення при розробці способів забезпечення стійкості виробок. Залежності на рис. 5 та 6 з коефіцієнтами кореляції відповідно 0,99 та 0,97 апроксимуються кривими вигляду  $U_{\max} = a \cdot (b - e^{-c\lambda})$  та  $U_{\max} = a + b \cdot \cos(c\lambda + d)$  відповідно, де  $a, b, c, d$  – коефіцієнти апроксимації.

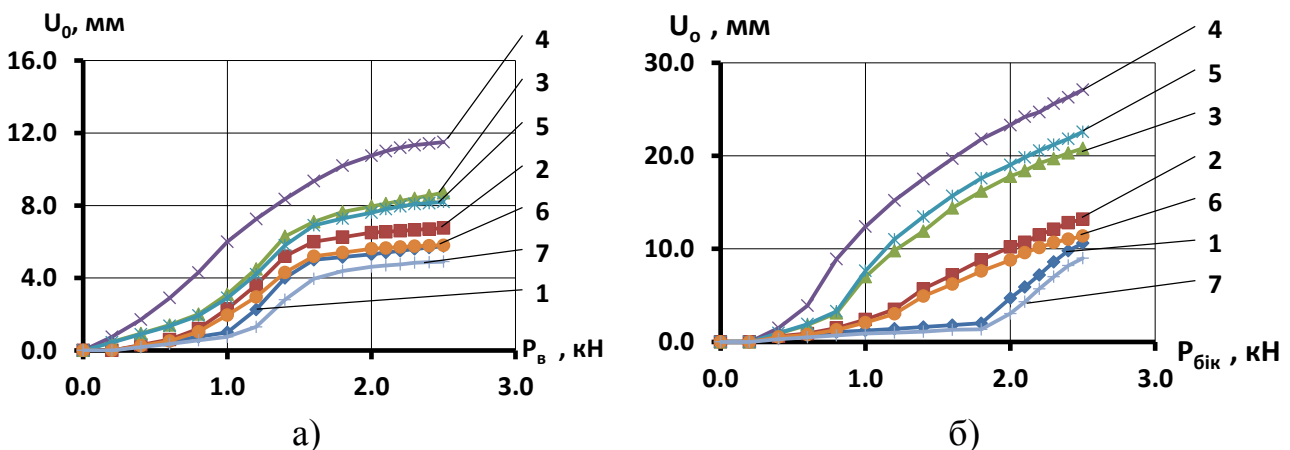


Рис. 4. Залежності величини здмання підшви  $U_0$  від величини вертикального навантаження  $P_v$  ( $P_{\text{бік}}=0$  кН) (а) та величини сумарного бічного навантаження  $P_{\text{бік}}$  ( $P_v=0,65$  кН) (б) на стенді при кутах нахилу шарів порід: 1 –  $0^\circ$ , 2 –  $15^\circ$ , 3 –  $30^\circ$ , 4 –  $45^\circ$ , 5 –  $60^\circ$ , 6 –  $75^\circ$ , 7 –  $90^\circ$

Зазначені особливості розвитку здмання в підшві виробки на моделях з еквівалентних матеріалів вказують на те, що характер розвитку процесу істотно



залежить від специфічних умов експлуатації виробки, що було перевірено під час виконання спостережень в шахтах. Натурні вимірювання процесу здимання гірських порід у виробці виконувалися для різних гірничо-геологічних умов у бремсбергу № 2 пласта L8 гор. 550 м на шахті «Білозерська» ДП «Добропіллявугілля», в Центральному допоміжному уклоні, в Центральній вентиляційній магістралі та у вентиляційному ходку 6-ї західної лави пласта  $m_3$  гор. 1100 м на шахті ім. В.М. Бажанова ДП «Макіїввугілля».

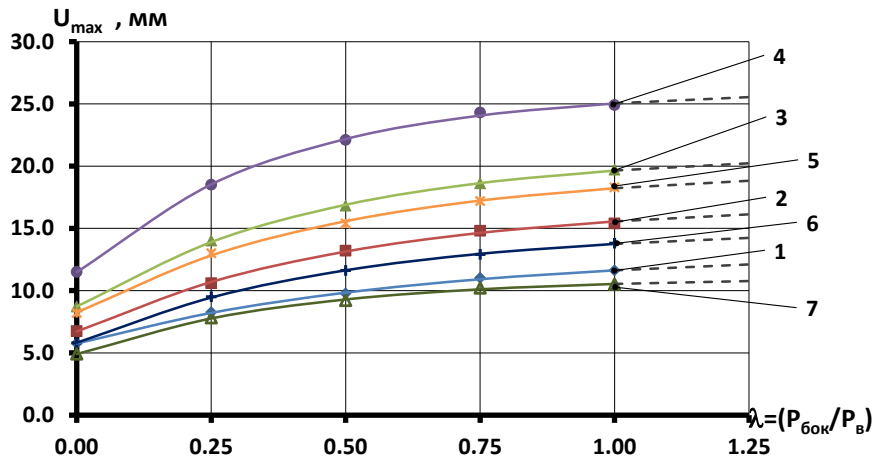


Рис. 5. Залежності максимальної величини здимання підшови  $U_{\max}$  від величини коефіцієнта бічного розпору  $\lambda$  при кутах нахилу шарів порід  $\alpha$ : 1 –  $0^\circ$ , 2 –  $15^\circ$ , 3 –  $30^\circ$ , 4 –  $45^\circ$ , 5 –  $60^\circ$ , 6 –  $75^\circ$ , 7 –  $90^\circ$

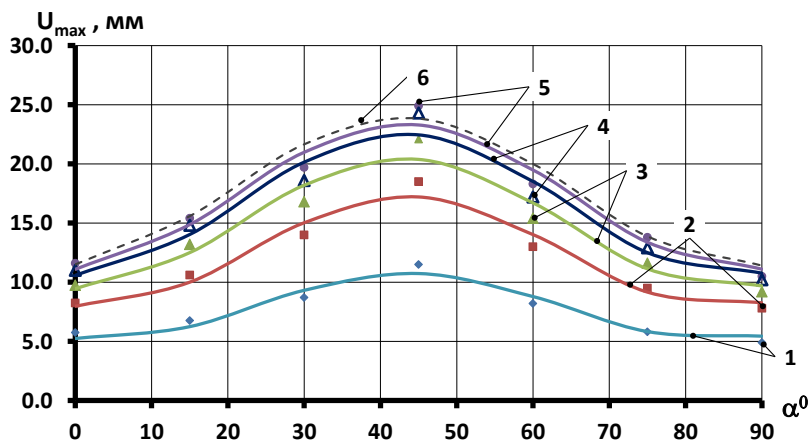


Рис. 6. Залежності максимальної величини здимання підшови  $U_{\max}$  від величини кута нахилу шарів порід  $\alpha$  при величині коефіцієнта бічного розпору  $\lambda$ : 1 – 0, 2 – 0,25, 3 – 0,5, 4 – 0,75, 5 – 1,0, 6 – 1,25

Основними контрольованими параметрами були вертикальна і горизонтальна конвергенція, опускання покрівлі та підняття підшови. Загальний стан виробок оцінювався за показником стійкості  $\omega = (N_0 - N)/N_0$ , де  $N_0$  та  $N$  – загальна кількість рам кріплення на дослідній ділянці та кількість тих рам, що перебувають в незадовільному стані, відповідно. Вибіркові результати вимірювань наведені на рис.7. Їх аналіз показав, що процес здимання в різних гірничо-

геологічних умовах протікає в часі за одним й тим же законом ( $T$  – час спостережень):

$$U_n = a \cdot (1 - e^{-bT}),$$

але залежно від параметрів апроксимації  $a$  та  $b$  може бути або затухаючим (рис. 7, а,б) або незатухаючим (рис. 7, в), що узгоджується із картиною здимання, отриманою на моделях з еквівалентних матеріалів.

Отримані залежності покладені в один з блоків обчислювальної програми з оцінки геомеханічних станів протяжних виробок, які знаходяться поза зоною впливу очисних робіт.

Чисельне моделювання геомеханічних процесів передбачає, перш за все, отримання аналітичних залежностей, що описують, з одного боку, напружено-деформований стан досліджуваного об'єкта, а з іншого – особливості руйнування порід у приконтурному просторі. Руйнування породного масиву відбувається в результаті досягнення компонентами тензора напружень деяких критичних значень. При цьому розглядаються два варіанти докладання зовнішніх впливів до кордонів аналізованої області:

- 1) у режимі заданих навантажень;
- 2) у режимі заданих деформацій.

У роботах В.В. Виноградова, Г.Т. Кірнічанського, О.М. Шашенка доведено, що руйнування породного масиву навколо одиночних виробок відбувається саме в режимі заданих деформацій. Характерною особливістю графіків деформування породних зразків, що піддаються навантаженню в такому режимі, є наявність поза межних ділянок (рис. 8).

Великий внесок у вивчення процесу руйнування гірських порід за межею міцності внесли Л. Фрідман, П. Бернард, Ф. Дейст, В. Кук, В.В. Виноградов,

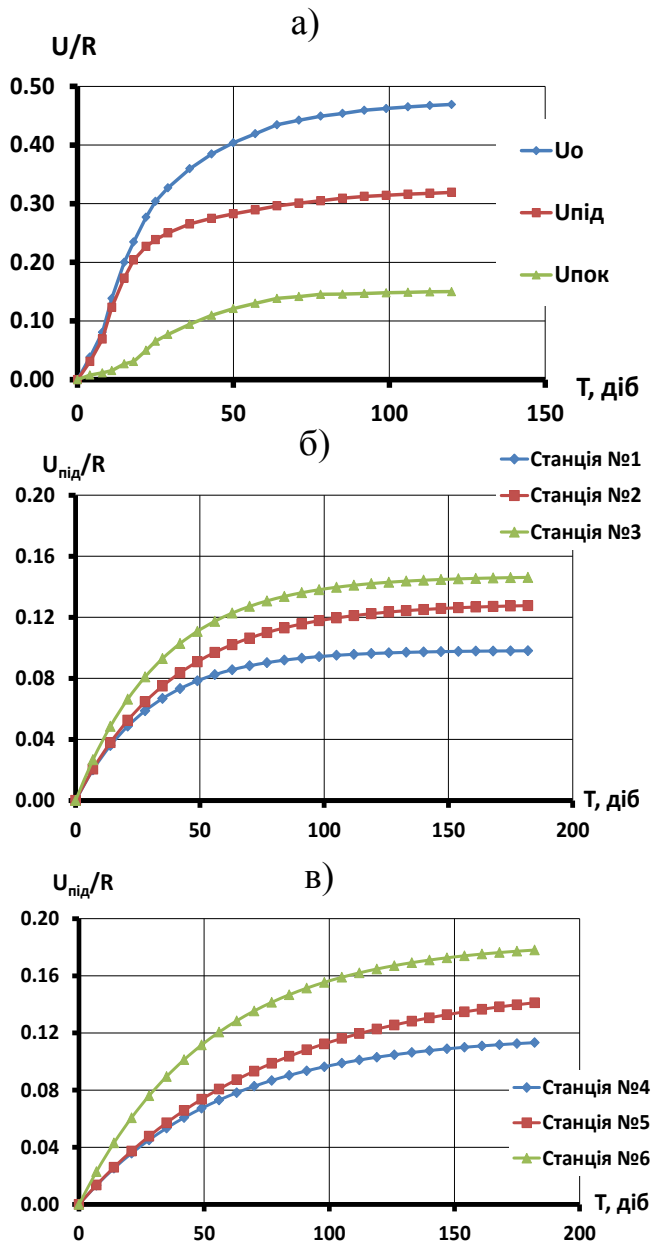


Рис. 7. Відносні переміщення підошви за даними спостережень у виробках: а) бремсберг №2 пл. L8 гор. 550 м шахти «Білозерська»; б) Центральний допоміжний уклон гор. 1100 м та в) Центральна вентиляційна магістраль гор. 1100 м шахти ім. В.М. Бажанова

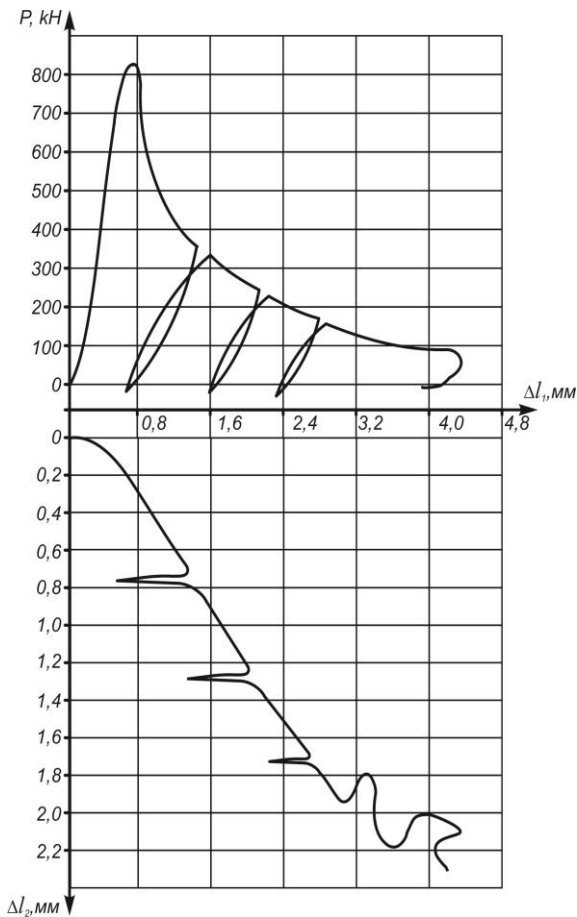


Рис. 8. Характерний графік деформування зразків аргіліта при випробуваннях в режимі заданих деформацій (за даними О.М. Шашенка)

контур зони непружних деформацій, а нижня – переміщення навколо виробки, в тому числі і на контурі.

Г.Т. Кірнічанський, А.М. Ставрогін, А.Г. Протосеня, Л.І. Ліньков, І.В. Баклашов, Б.А. Картозія, О.М. Шашенко і багато інших дослідників

У пружній області напруження і деформація зв'язані співвідношеннями Гука. У пластичній області вони не виконуються, і зв'язок між граничними значеннями напружень і деформацій повинний бути встановлений емпіричним шляхом. Така залежність може бути отримана, виходячи з припущення про подібність механічних явищ, що відбуваються в локальній точці навколо виробки і при руйнуванні породного зразка в режимі заданих деформацій. У дисертації це названо «гіпотезою відповідності», графічна інтерпретація якої наведена на рис. 9. Роль жорсткого навантажуючого пристрою при цьому виконує частина породного масиву, що пружно деформується. Навантаження відбувається повільно зі швидкістю посування виробки.

Реальний трикомпонентний напружений стан в приконтурній області при цьому замінюється на еквівалентний одновісний, як це прийнято при виведенні теорій міцності гірських порід. У гіпотезі вважається, що верхня частина діаграми формує

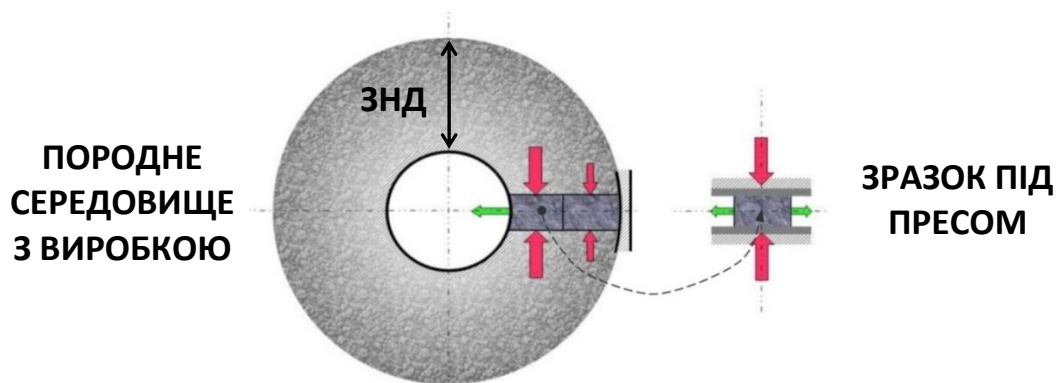


Рис. 9. Аналогія механічних явищ в породах зони недружніх деформацій (ЗНД) та в зразку, що деформується в режимі заданих деформацій

Для дослідження напружено-деформованого стану середовищ з розміщенням найкраще підходять чисельні методи, зокрема, найбільш гнучкий і поши-

рений метод скінчених елементів (МСЕ). Аналіз показує, що програмні комплекси, які засновані на МСЕ і враховують як правило наявність верхньої частини діаграми жорсткого деформування, дають задовільні результати при визначенні напружень, тоді як стосовно переміщень завжди є суттєва розбіжність з натурними вимірами. Ця обставина змушує дослідників застосовувати емпіричні коефіцієнти, які роблять отримані результати розрахунків більш адекватними до реальності.

Врахування в алгоритмі рішення задачі методом МСЕ нижньої гілки діаграми дозволяє прибрати цей недолік, але вимагає розробки особливого підходу до складання вихідних фізичних рівнянь. У дисертації ця проблема вирішена у вигляді покрокової процедури, модель якої наведена на рис. 10. Зазначена процедура є удосконалення раніше розробленого підходу, який не включав нижню гілку повної діаграми деформування, а, отже – був недостатньо адекватним в частині оцінки переміщень. Основою процедури є метод пружних рішень А.А. Іл'юшина, адаптований для середовищ із розпушенням.

Ідеалізована повна діаграма деформування, що використана для побудови процедури розрахунку, складається з трьох частин (рис. 10): лінійної ділянки пружної деформації  $OA$ , спадаючої гілки граничних напружених станів  $AB$  та гілки  $OC$ , що описує об'ємні деформації  $\varepsilon_v$ . Точка  $A$  відповідає граничним напруженням і деформаціям пружності ( $\sigma = R_c$ ,  $\varepsilon = \varepsilon_c$ ,  $\varepsilon_v = 0$ ), а точки  $B$  і  $C$  – напруженням і деформаціям остаточного руйнування ( $\sigma = R_*$ ,  $\varepsilon = \varepsilon_*$ ,  $\varepsilon_v = \varepsilon_{v(*)}$ ). За деяку кількість кроків  $n$  рішення деформація в досліджуваній точці середовища набуває деякого значення  $\varepsilon_n$  ( $\varepsilon_c < \varepsilon_n \leq \varepsilon_*$ ). Спадаюча гілка діаграми може бути подана наступною функцією

$$\sigma = R_c - f\left(\varepsilon - \frac{R_c}{E}\right); \quad f(0) = 0, \quad \frac{df}{d\varepsilon} > 0, \quad (4)$$

де  $E$  – модуль Юнга. Тоді, якщо на деякому кроці рішення  $m$  чисто пружного деформування (уздовж ділянки  $OA$ ) гранична величина напруження  $R_c$  буде перевищена, то відповідно до виразу (4) точці  $A_m$  ( $\varepsilon_m$ ;  $R_m$ ) на спадаючій гілці може бути поставлена у відповідність точка  $B_m$  ( $\varepsilon_m$ ;  $R_m$ ) і точка  $C_m$ , що лежить на кривій об'ємних деформацій і визначає відповідне значення об'ємної деформації  $\varepsilon_{v(m)}$ . При цьому величина напружень  $R_m$  набуває сенсу поточної межі міцності на даному кроці рішення. Таким чином, використовуючи спадаючу криву діаграми деформування, ми визначаємо граничний напружений стан в точці  $B_m$ , при цьому нижня частина діаграми дозволяє отримати об'ємні деформації і, при відомому з експериментів співвідношенні між поздовжніми і поперечними складовими – переміщення в заданій точці приконтурного простору. Поточний напружений стан на кожному кроці рішення оцінюється за еквівалентним напруженням, величина якого повинна встановлюватися за однією з достатньо обґрунтованих теорій міцності. В якості таких для плоскої деформації прийнято критерій міцності Л.Я. Парчевського-О.М. Шашенка, для об'ємної задачі – критерій міцності П.П. Баландіна.

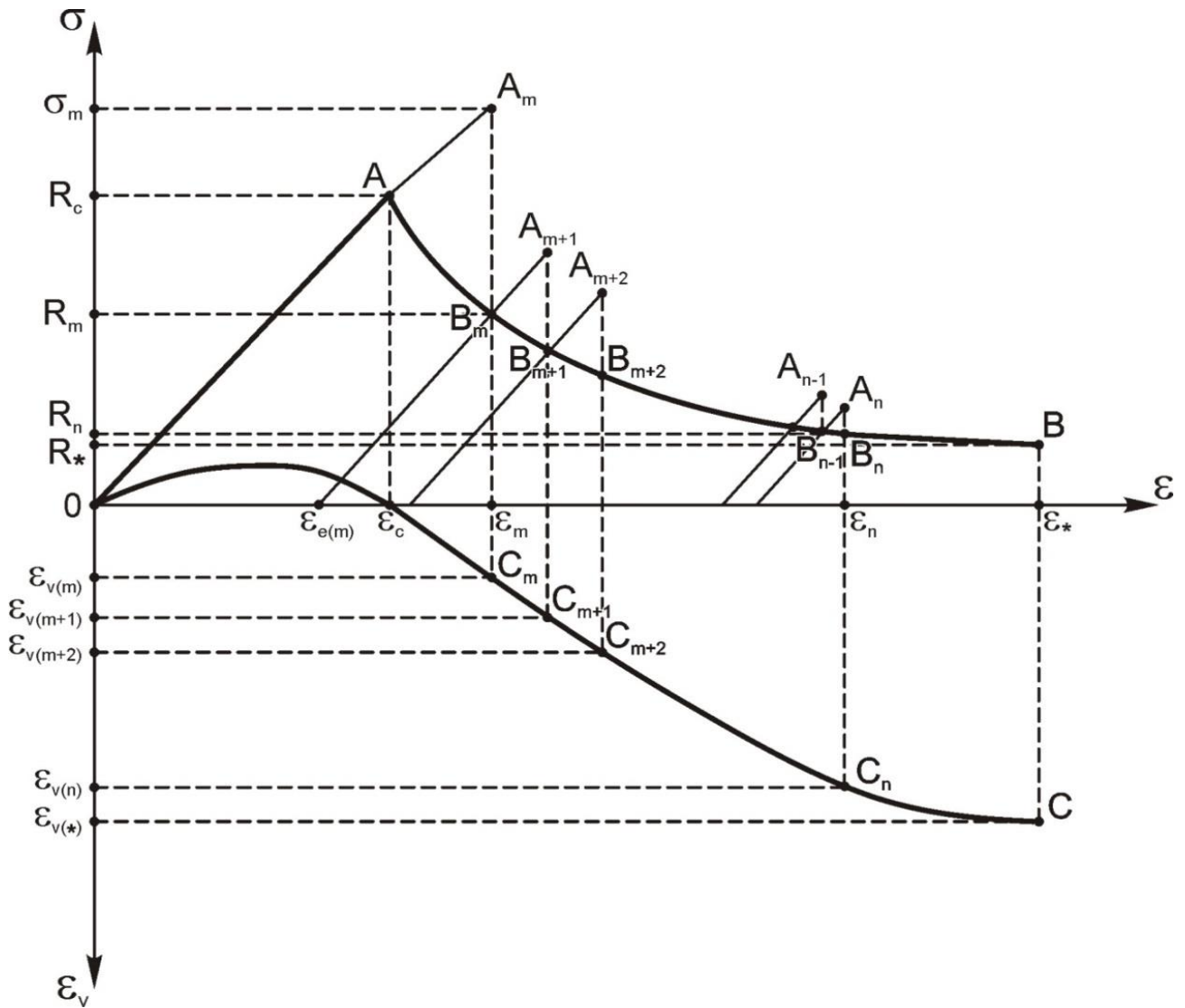


Рис. 10. Модель покрокової процедури вирішення геомеханічних задач, яка враховує об'ємні деформації гірської породи за межею міцності

В дисертації наведена скінчено-елементна реалізація алгоритму рішення пружнопластичної задачі для середовища з розміщенням. Він був випробуваний для вирішення задачі про здимання порід підшови в протяжних виробках. При цьому явище здимання порід підшови розглянуто як процес втрати пружнопластичної стійкості приконтурного масиву, що знаходиться в умовах заданих деформацій. Критерій стійкості підшови, за яким відбувався перехід до процедури імітаційного моделювання здимання, був прийнятий у вигляді  $K_y = ((r_L^*) / (r_{Li})) < 1$ , де  $r_{Li}$  – розрахунковий відносний радіус зони непружних деформацій для  $i$ -го кроку розрахунку, а величина критичного радіуса зони непружних деформацій (ЗНД)  $r_L^*$  визначається за виразом  $r_L^* = 1 + \varepsilon_v^{-0,4}$  ( $\varepsilon_v$  – середнє відносне збільшення об'єму порід у ЗНД). Розрахункова схема вирішення задачі наведена на рис. 11. Тут  $\Delta U$  – величина критичного підняття порід підшови, з якого вертикальні переміщення підшови можна інтерпретувати як здимання.

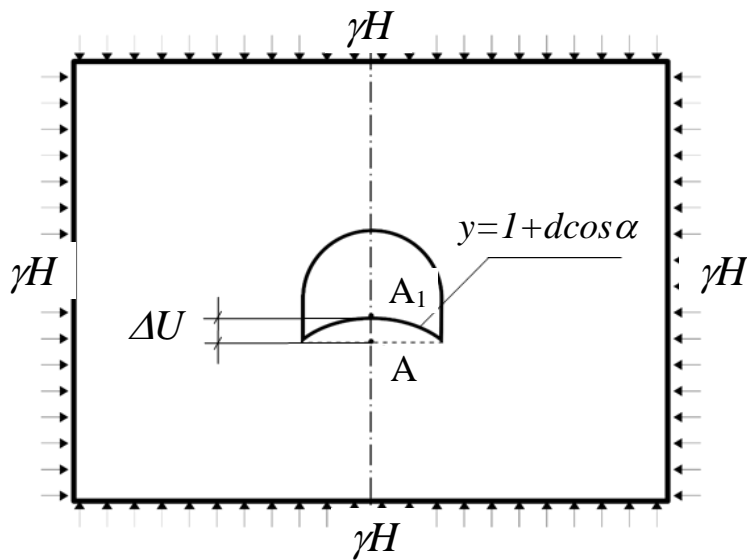


Рис. 11. Розрахункова схема вирішення задачі про здимання порід в підшві виробки

Імітаційне моделювання здимання виконується покроково, що дозволяє задавати позакритичні переміщення (ті, що розвиваються в масиві після початку процесу втрати стійкості підшви) малими частками, рівними кількості кроків рішення, отримуючи картину зміни напружено-деформованого стану модельованої геомеханічної системи в міру розвитку процесу здимання. Процедура передбачає додавання величин додаткових переміщень залежно від історії розвитку процесу

зміни напружено-деформованого стану в масиві навколо модельованої виробки. Таким чином, в дисертації удосконалена розроблена раніше процедура імітаційного моделювання явища здимання порід підшві протяжної виробки, яка дозволяє врахувати етапи історії розвитку переміщень в її підшві.

Основна проблема, з якою доводиться стикатися при вирішенні задач для твердих тіл із розміцненням, полягає в отриманні повних діаграм деформування за межею міцності. Зазвичай це робиться на пресах підвищеної жорсткості, які складно конструювати. Часто в лабораторіях користуються спрощеним методом, включаючи в роботу паралельно з випробуваним зразком деякий додатковий елемент підвищеної жорсткості, яким в експерименті слугував відрізок двотавра №20. Випробуваннями піддавалися зразки порід, що були відібрані у виробках шахти «Родина» Криворізького ЗРК. На рис. 12,а показані отримані діаграми деформування цих порід.

Слід зазначити, що отримання повних поза межних залежностей в лабораторних умовах є дуже складним нетривіальним завданням, для вирішення якого потрібно задовольнити багато вимог, зокрема, потрібна відповідна навантажувальна машина, достатня кількість зразків порід, придатних для виконання випробувань в режимі заданих деформацій, вкрай необхідна автоматична система фіксації результатів тощо. Для отримання повної діаграми деформування в дисертації розроблена методика, заснована на чисельному моделюванні деформування породних зразків. Дана методика є удосконаленням раніше розробленого І.Ю. Старогіторовим алгоритму імітаційного моделювання випробувань зразків і дозволяє отримувати повні діаграми з достатньою для чисельного моделювання точністю.

Схема побудови таких імітаційних повних діаграм наведена на рис. 13. Для цього треба мати вихідні дані, які отримують в ході стандартних випробувань зразків гірських порід (межі міцності на одновісний стиск  $R_c$ , зрушення  $R_\tau$  та

однорізне розтягування  $R_p$ ; коефіцієнт крихкості  $\psi$ ; модуль Юнга  $E$ ; коефіцієнт Пуассона  $\mu$ ; параметри закону розподілу – дисперсія  $D$  и математичне сподівання  $m$ ).

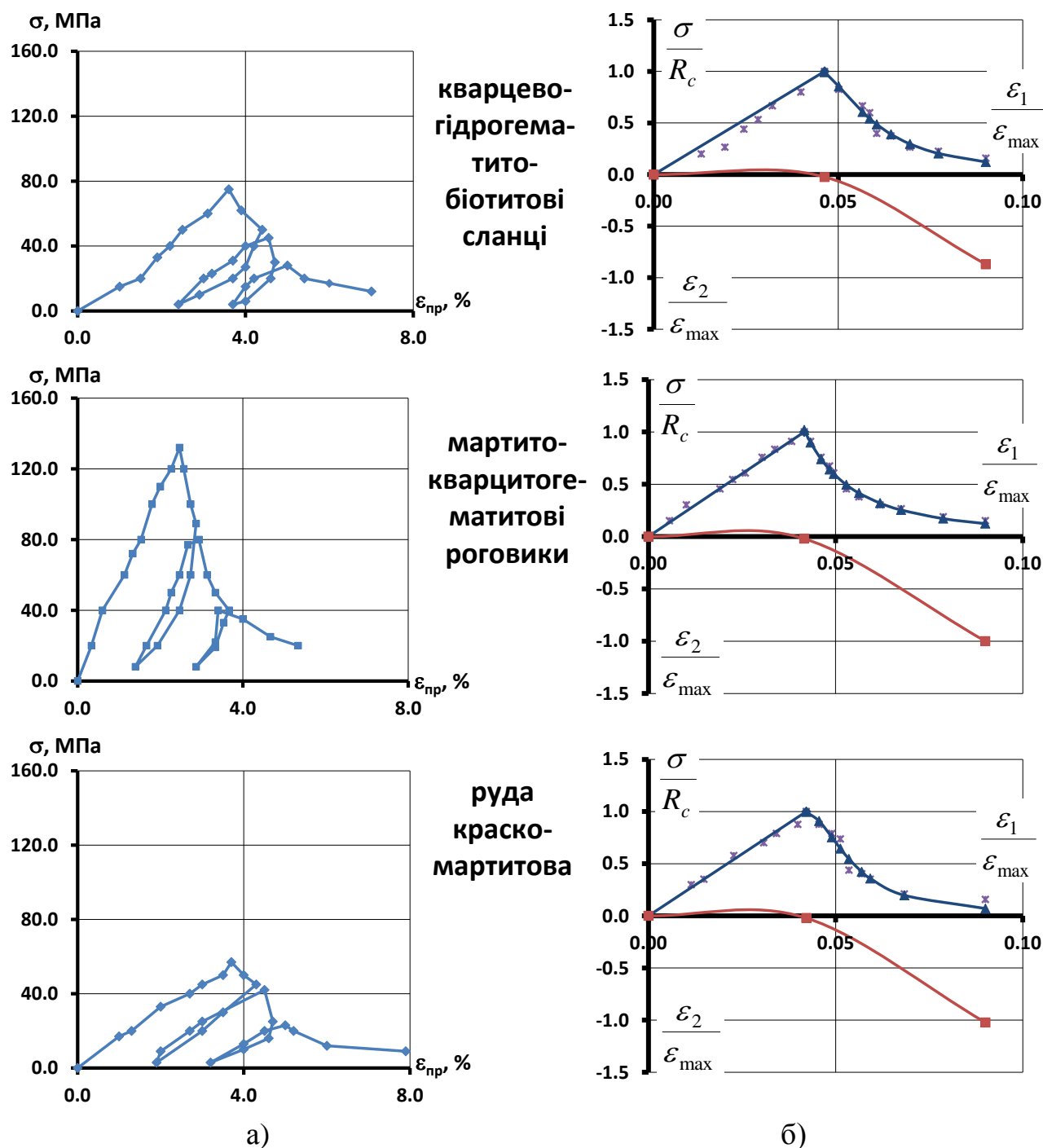


Рис. 12. Графіки деформування криворізьких порід за межею міцності (а), отримані під час лабораторних випробувань криворізьких гірських порід та імітаційні повні криві деформування цих порід (б) у відносних координатах

Верхня гілка пружної частини діаграми будується за величинами  $R_c$  та  $\epsilon_1 = R_c/E$ . Виходячи з виразу  $\epsilon_1 + 2\epsilon_2 = 0$ , встановлюється величина  $\epsilon_2 = -(\epsilon_1)/2$ , за якою будується нижня гілка пружної частини (рис. 13, а). За результатами імітаційного чисельного моделювання випробування зразків в режимі контро-

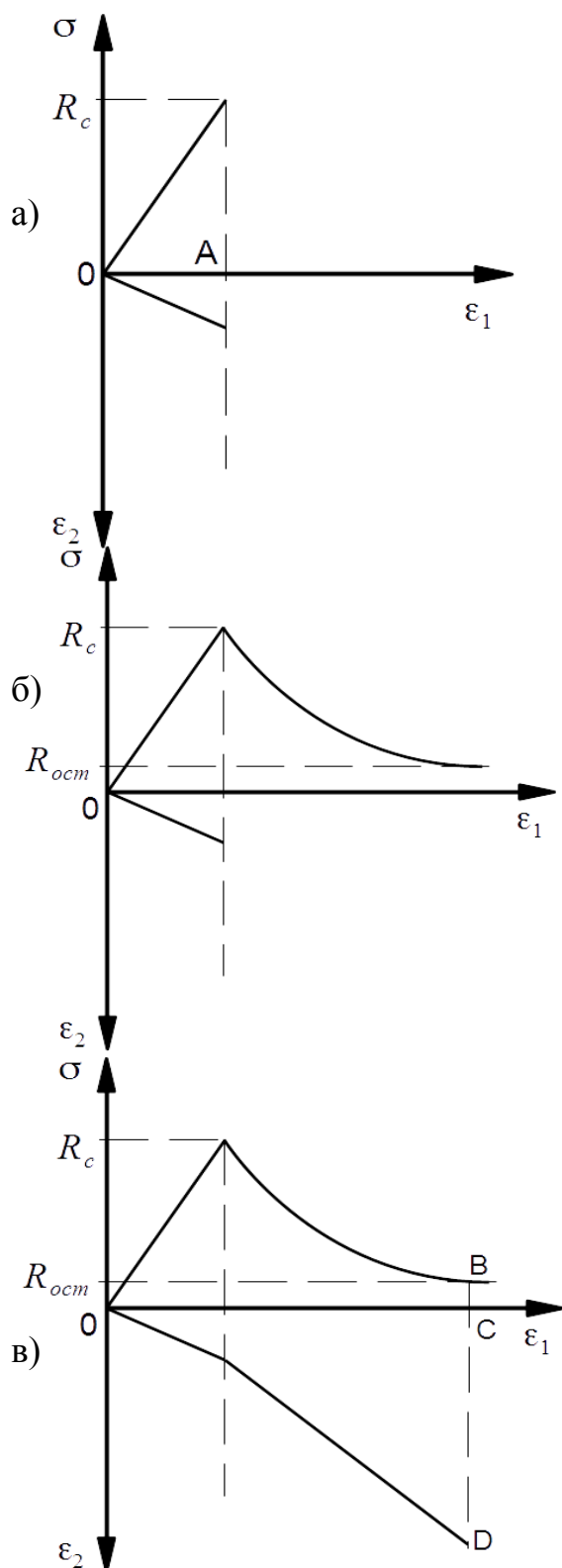


Рис. 13. Етапи побудови імітаційних повних діаграм деформування на підставі лабораторного тестування породних зразків та імітаційного чисельного моделювання

льованого руйнування з урахуванням параметрів закону розподілу міцності, що встановлюється під час лабораторних випробувань реальних зразків, будується верхня спадаюча гілка повної діаграми як геометричне місце точок граничних пружних станів матеріалу аж до тієї її частини, яка відповідає переходу зразка в стан еквіволіуміальної течії та досягнення ним залишкової міцності  $R_{ост}$  (рис. 13, б).

Завершивши побудову верхньої спадаючої гілки, переходять до побудови лінеаризованої нижньої гілки, приймаючи до уваги, що  $BC = R_{ост} \approx 0,1R_c$  і  $BC/CD = \psi$  (рис. 13, в), та встановлюють довжину відрізка CD, яка дорівнює  $CD = \epsilon_2 = (R_{ост}/\psi)$ . Після нанесення точки з координатами  $(\epsilon_1; \epsilon_2)$  на нижню частину повної діаграми, її з'єднують з точкою, яка відповідає переходу на позамежну гілку, і, отже, будують лінеаризовану форму нижньої позамежної гілки повної діаграми деформування. Побудовані за вказаною методикою повні криві деформування зразків порід Кривого Рогу наведені на рис. 12,б

Блок-схема вирішення задач геомеханіки на основі викладених вище гіпотез і моделей наведена на рис. 14. Перевірка алгоритму була виконана на тестовій задачі, в якості якої було використане точне аналітичне рішення задачі про НДС геомеханічної системи «кругла виробка-однорідний масив» за умови, що  $\lambda=1$ , розрахункова схема якої наведена на рис. 15.

Вираз для визначення величини радіальних переміщень на контурі виробки з урахуванням різного ступеня розпушення породи по ширині зони непружних деформацій навколо неї можна записати у вигляді інтеграла, який охоплює область від контуру виробки (нижня межа інтегрування, тобто величина відносного радіуса ЗНД дорівнює одиниці) до кордону області (верхня межа інтегрування, тобто величи-



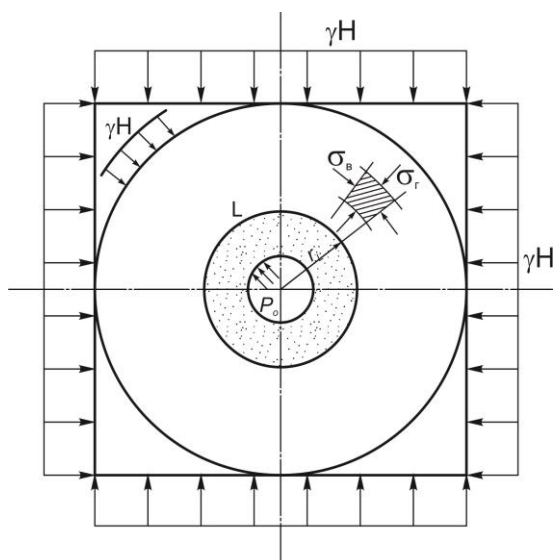


Рис. 15. Розрахункова схема до вирішення задачі про рівновагу породного масиву навколо одиночної горизонтальної виробки при  $\lambda=1$

на відносного радіуса ЗНД дорівнює  $r_L$ ):

$$U_0 = \varepsilon_v^* \int_1^{r_L} \left( 1 - \frac{r^2 - 1}{r_L^2 - 1} \right) \cdot dr,$$

де  $\varepsilon_v^*$  – максимальна величина об'ємного розпушення;  $r$  – поточна координата. Вирішуючи інтеграл відносно  $r_L$ , отримуємо остаточний вираз для визначення переміщень на контурі виробки, який було враховано в алгоритмі рішення пружнопластичної задачі:

$$U_0 = \varepsilon_v^* \left( \frac{2r_L^2 - r_L - 1}{3(r_L + 1)} \right).$$

У таблиці 3 наведені дані, отримані з точного аналітичного рішення, яке прийнято за тестове, з обчислень, виконаних в роботі І.Ю. Старотіторова та за пропонованим алгоритмом. Їх порівняння показує практично повний збіг рішень як в частині визначення радіуса зони непружних деформацій, так і в частині визначення переміщень контуру виробки.

аблиця 3

Порівняння результатів аналітичного та чисельних рішень, отриманих за різними алгоритмами розрахунків

Показник	Точне рішення	Чисельне рішення за алгоритмом		Відхилення від точного рішення, %, за алгоритмом	
		І.Ю. Старотіторова	пропонованим	І.Ю. Старотіторова	пропонованим
$r_L$	2,31	2,30	2,32	0,4	0,4
$U_0$ , м	0,28	0,183	0,258	34,6	7,86

Виконані дослідження дозволили зробити висновок, що при «жорсткому» навантаженні приконтурного масиву переміщення довільної точки, що знаходиться на відстані  $r$  від межі зони непружних деформацій  $r_L$  визначаються інтегруванням з урахуванням спадкової пам'яті про рівень руйнування структурних зв'язків на інтервалі « $r_L - r$ », що дозволяє на основі такої деформаційної моделі більш точно визначати переміщення контуру виробки і прогнозувати її стійкість.

На рис. 16 з урахуванням всіх прийнятих обґрунтувань наведено графік залежності основного геомеханічного показника стану виробки – переміщень її контуру, від величини об'ємного розпушення й показника умов розробки.

## початок вирішення

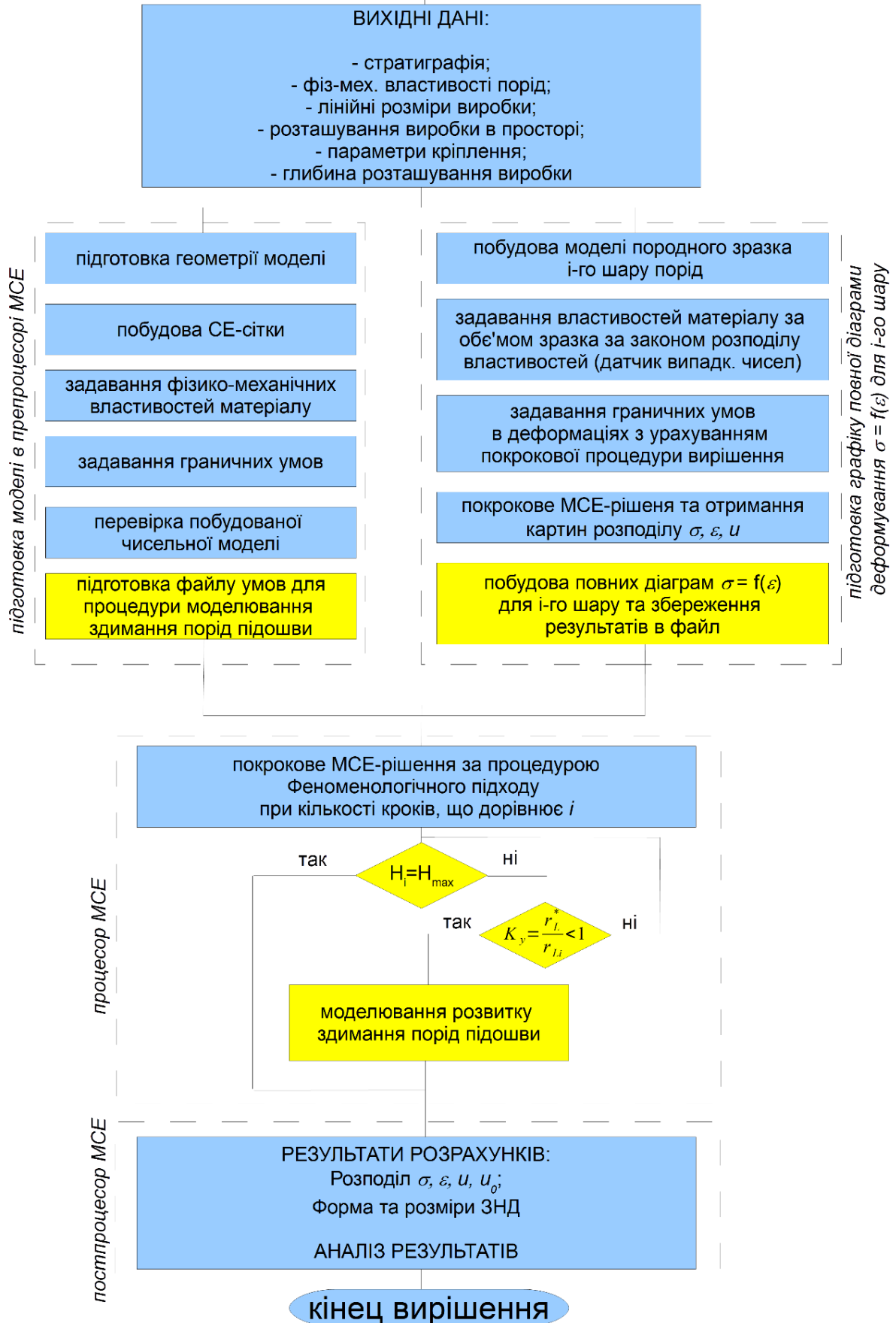


Рис. 14. Блок-схема удосконаленої процедури чисельного вирішення гео-механічних задач

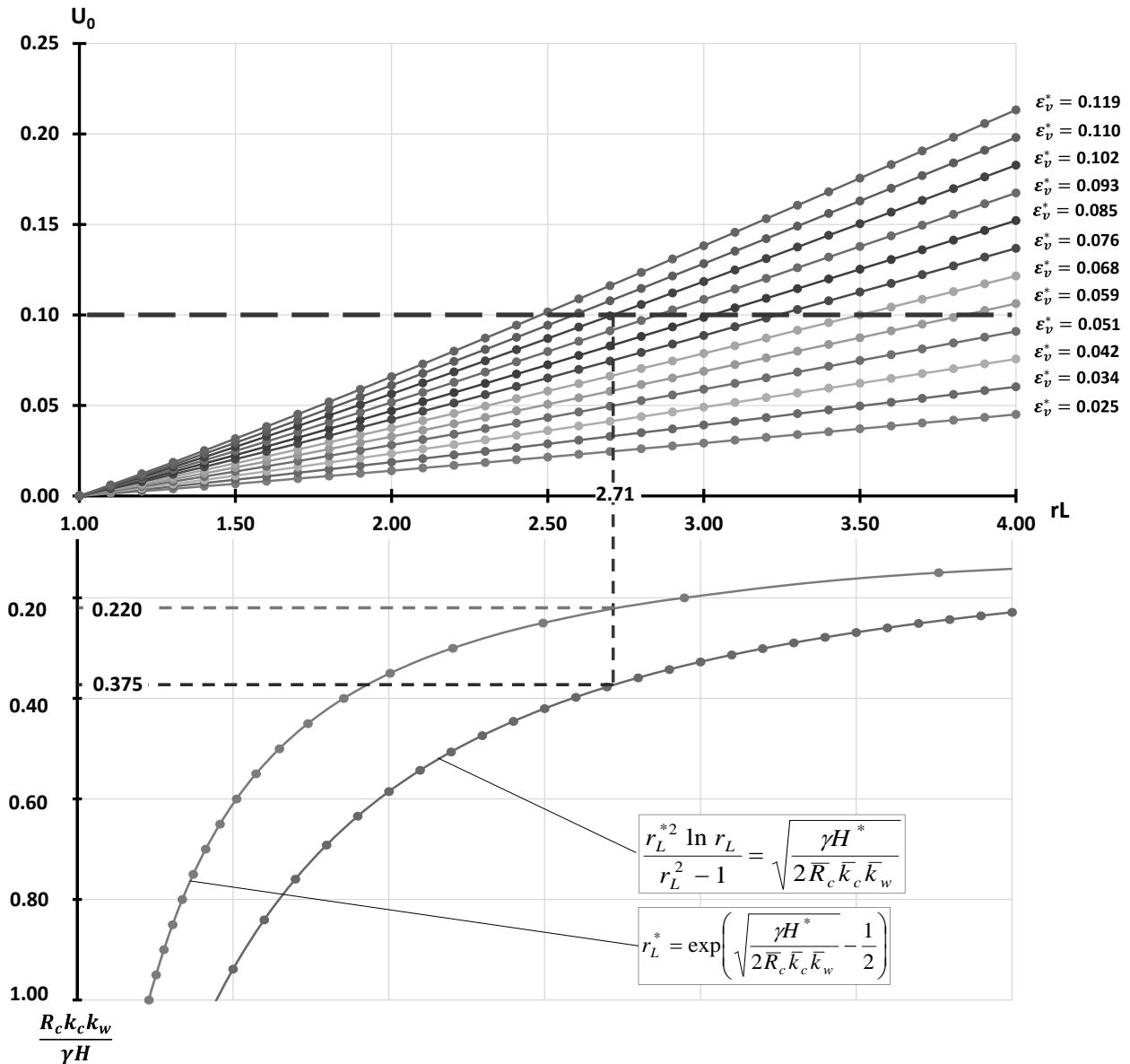


Рис. 15. Номограма для встановлення величини переміщень на контурі виробки з урахуванням ступеня розпушення порід в зоні непружних деформацій

Дві криві в нижній частині показують, наскільки істотним є врахування поза межних частин діаграми при визначенні основного геомеханічного показника – переміщень контуру виробки, який легко виміряти в натурних умовах. Можна вважати доведеним той факт, що при  $u_0 \geq 0,1$  починаються процеси здимання порід підшоши, що призводять до суттєвих проблем під час експлуатації виробок. Цій величині переміщень відповідає показник умов розробки, рівний 0,4, що дозволяє на стадії проектування планувати заходи, пов'язані з підвищенням стійкості виробок/

Виконані дослідження дозволили стверджувати, що пружнопластичний стан високонантаженої геомеханічної системи, що містить протяжну виробку та складається з неоднорідного породного середовища, властивості якого підпорядковуються логнормальному закону розподілу, деформується в режимі заданих деформацій аналогічно руйнуванню породного зразка на «жорсткому»

пресі, при цьому верхня гілка повної діаграми деформування відповідальна за формування зовнішніх розмірів ЗНД, а нижня – за переміщення на контурі виробки, що дозволяє досить точно прогнозувати і забезпечувати стійкість гірничих виробок.

Отримані в дисертації результати досліджень знайшли відображення в комплексній методиці оцінки параметрів геомеханічної системи «породний масив – виробка», для практичної реалізації основних пунктів якої в дисертації розроблений відповідний авторський програмний продукт, адекватність якого була перевірена на ряді вугільних шахт Донбасу та рудників Кривого Рогу під час обґрунтування параметрів способів забезпечення стійкості протяжних виробок.

Для шахти «Шахтарська-Глибока» ДП «Шахтарськантрацит» були оптимізовані схеми кріплення та охорони 1-го східного конвеєрного штрека пл. h8 пуклонного поля центрального блоку з відміткою підосви 1386 м. Як об'єкт досліджень на шахті «Комсомольська» ДП «Антрацит» був обраний 16-й західний конвеєрний штрек пласта h10 горизонту 880 м, для умов якого була виконана оптимізація системи комбінованої кріплення, заснована на аналізі 3-х варіантів. У гірничо-геологічних умовах рудника «Родина» (Кривбас) була виконана оптимізація розташування південного польового штреку гор. 1315 м, пройденого в істотно неоднорідних породах. Результати, отримані під час перевірки пропонувананих параметрів підтримання виробок у натурних умовах показали достатньо високу збіжність теоретичних розрахунків з шахтними вимірюваннями – максимальний розкид при оцінці переміщень контуру виробок не перевищив 19%. Економічний ефект у всіх випадках досягався за рахунок зниження кількості ремонтних робіт та підвищення стійкості виробок і склав понад 403 тис. грн на 1000 м виробки. Також основні положення та розроблені в дисертації рішення були використані під час виконання низки науково-дослідних робіт на замовлення вугільних підприємств України та в навчальному процесі Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет», включаючи підготовку аспірантів.

## ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій на підставі вперше встановлених закономірностей деформування геомеханічних систем «виробка-масив» для умов великих глибин виконано узагальнення і отримано нове рішення актуальної науково-практичної проблеми прогнозу і забезпечення стійкості виробок глибоких шахт, розташованих в структурно-неоднорідному породному масиві.

Основні наукові та практичні результати, висновки і рекомендації роботи полягають у наступному.

1. Встановлено, що відносна величина переміщень контуру протяжних виробок, розташованих у структурно неоднорідному породному масиві, є експоненціальною функцією комплексного показника умов розробки, на підставі якої можна судити про рівень складності геомеханічного стану структурно неодно-

рідного породного масиву і можливості віднесення його до складного (проблемного). При цьому критерій такого віднесення має вигляд  $\frac{U_0}{R_0} = a \cdot \exp(b) \leq 0,1$ .

2. На основі статистичної теорії міцності отримана базова формула для оцінки структурного ослаблення залежно від гіпотетичної функції розподілу міцності структурних елементів масиву. Досліджено вплив мінливості відстані між тріщинами на варіацію міцності структурних елементів на основі використання розподілу Релея як ймовірнісної моделі випадкового відстані між тріщинами.

3. Встановлено, що відмінність міцності породного масиву від міцності лабораторних зразків визначається варіацією відстані між тріщинами в межах 50-52% відповідно до закону Релея, експоненційно знижується в залежності від цього параметра, що дозволяє підвищити точність оцінки опірності порід і надійність проектування виробок.

4. При виконанні моделювання на еквівалентних матеріалах процесу здимання порід підосви досліджено характер розвитку процесу при різному співвідношенні величин бічного і вертикального навантажень, з урахуванням різної величини кута падіння шарів в моделі. Аналіз результатів досліджень показав, що кут нахилу  $\alpha$  шарів порід у моделі помітно впливає на величину і характер переміщень порід в підосви виробки при одній і тій же величині  $\lambda$  (відношення бічного навантаження до вертикального); максимальні переміщення і найбільша інтенсивність розвитку переміщень підосви має місце при куті нахилу шарів  $45^\circ$  незалежно від величини  $\lambda$ ; при  $\lambda = 0,75$  і  $1,0$  максимальні зміщення при будь-яких кутах нахилу шарів  $\alpha$  виявляються за величиною досить близькими (різниця не перевищує 7%), і при  $\lambda = 1,0$  і  $1,25$  - менше, ніж 5%.

5. Доведено, що при «жорсткому» навантаженні приконтурного масиву переміщення довільної точки, що знаходиться на відстані  $r$  від межі зони непружних деформацій  $r_L$  визначаються інтегруванням з урахуванням спадкової пам'яті про рівень руйнування структурних зв'язків на інтервалі « $r_L - r$ », що дозволяє на основі такої деформаційної моделі більш точно визначати переміщення контуру виробки і прогнозувати її стійкість.

6. При вирішенні завдань геомеханіки з розміцненням і розпушуванням введена гіпотеза відповідності, яка полягає в тому, що механічні явища, котрі відбуваються при «жорсткому» руйнуванні породного зразка в режимі заданих деформацій, відповідають процесам, що протікають при деформуванні довільного одиничного об'єму породного масиву навколо гірничої виробки. При цьому роль «жорсткого» навантажувального пристрою грає область породної середовища, що пружно деформується та розташована за областю непружних деформацій.

7. Запропонований підхід до вирішення нелінійних геомеханічних задач структурного аналізу, що враховує, на відміну від раніше розробленого подібного підходу, не тільки ефект розміцнення середовища навколо гірничої виробки, але і її розпушення, що дозволяє отримувати рішення таких задач, досить

адекватні не тільки в частині результатів за напруженнями, але і в частині зміщень.

8. Удосконалена процедура імітаційного моделювання явища здимання порід підосви протяжної виробки, що дозволяє врахувати етапи історії розвитку переміщень в розглянутій виробці. Процедура розглядає напружено-деформований стан, що формується при розвитку здимання, як додатковий до НДС, отриманого на етапі пружнопластичного вирішення геомеханічної задачі. В основу процедури імітаційного моделювання покладено уявлення про здимання як про втрату пружнопластичної стійкості геомеханічної системи «виробка-породний масив».

9. Розроблена процедура отримання на чисельних моделях повних діаграм позамежного деформування зразків гірських порід. Дана методика є удосконаленням раніше розробленого І.Ю. Старотіторовим алгоритму імітаційного моделювання випробування зразків і дозволяє отримувати повні діаграми з достатньою для чисельного моделювання точністю.

10. Розроблений алгоритм, який об'єднує в собі підходи пружнопластичного рішення з урахуванням розміщення і розпушення, імітаційного моделювання здимання, отримання кривих позамежного деформування на чисельних моделях, адекватність якого доведена рішенням тестової задачі і порівнянням її результатів з точним аналітичним рішенням – відхилення в частині напружень склало 0,4%; відхилення в частині переміщень склало 7,86%.

11. На основі аналізу результатів комплексу досліджень встановлено, що пружнопластичний стан високонавантаженої геомеханічної системи, що містить протяжну виробку та складається з неоднорідного породного середовища, властивості якого підпорядковуються логнормальному закону розподілу, деформується в режимі заданих деформацій аналогічно руйнуванню породного зразка на «жорсткому» пресі, при цьому верхня гілка повної діаграми деформування відповідальна за формування зовнішніх розмірів ЗНД, а нижня – за переміщення на контурі виробки, що дозволяє досить точно прогнозувати і забезпечувати стійкість гірничих виробок.

12. Розроблена комплексна методика оцінки напружено-деформованого стану геомеханічної системи «породний масив-виробка», що відрізняється від відомих тим, що вперше прогнозовані переміщення в алгоритмі розрахунку визначаються на основі адекватної моделі руйнування гірських порід, що враховує наявність нижньої гілки на діаграмі випробування породних зразків в режимі заданих деформацій.

13. Реалізація розроблених у дисертації рішень здійснена на шахті «Шахтарська-Глибока» ДП «Шахтарськантрацит» при будівництві 1-го східного конвеєрного штреку пласта  $h_8$  уклонного поля центрального блоку (УП ЦБ) з очікуваним економічним ефектом 23,3 тис. грн. на 1000 п.м.; на шахті «Комсомольська» ДП «Антрацит» при забезпеченні стійкості 16 західного конв. штреку пласта  $h_{10}$  з очікуваним економічним ефектом понад 120 тис. грн. на 1000 п.м.; при оцінці стійкості геомеханічної системи «капітальна виробка-рудний масив» на шахті «Родина» ВАТ «Криворізький ЗРК» з очікуваним еко-

номічним ефектом 260 тис. грн. на 1000 п.м.; при виконанні науково-дослідних робіт для ПАТ «ДТЕК Шахта «Комсомолец Донбасу», шахт ДП «Макіїввугілля», шахти «Степова» ПАТ «ДТЕК ПАВЛОГРАДВУГІЛЛЯ», шахти «Добропільська» ВАТ «ДТЕК ДОБРОПЛІЯВУГІЛЛЯ»; у навчальному процесі Державного ВНЗ «Національний гірничий університет» при підготовці спеціалістів та магістрів за спеціальністю «Будівництво шахт і підземних споруд» і в науковій діяльності, включаючи підготовку аспірантів.

**Результати роботи і положення дисертації відображені у 59 наукових працях, основними з яких є наступні:**

1. Гапеев С.Н. Компьютерное моделирование геомеханических процессов / А.Н. Шашенко, А.В. Солодянкин, С.Н. Гапеев, А.К. Гавриш, Р.Н. Терещук, Н.В. Хозяйкина, А.Н. Пашко // Новые технические решения при строительстве выработок, тампонаже и закреплении горных пород: Монография / ред. П.Н. Довжиков, В.Д. Рябичев.– Донецьк: Норд-Пресс, 2006.– С.149-160.
2. Гапеев С.Н. Деформируемость и прочность массивов горных пород: Монография / А.Н. Шашенко, Е.А. Сдвижкова, С.Н. Гапеев.– Днепропетровск: НГУ, 2008. – 224 с.
3. Гапеев С.Н. Способ обеспечения устойчивости подготовительных выработок в условиях больших деформаций пород почвы (на примере шахты им. В.М. Бажанова) / С.Н. Гапеев, Н.В. Хозяйкина // Управление устойчивостью протяженных выработок глубоких шахт: Монография / А.Н. Шашенко, А.В. Солодянкин, А.В. Мартовицкий.– Д.: ООО «Лизу-новПрес», 2012.– С.255-274.
4. Гапеев С.Н. Результаты применения методики компьютерной оценки устойчивости протяженных выработок / А.Н. Шашенко, С.В. Кужель, С.Н. Гапеев // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр.– Днепропетровск: ИГТМ им. М.С. Полякова НАН Украины, 2004.– Вып.51.– С.42-48.
5. Гапеев С.Н. Комплексное исследование способа обеспечения устойчивости протяженной выработки с пучащей почвой, расположенной в зоне влияния лавы / А.Н. Шашенко, А.В. Мартовицкий, С.Н. Гапеев // Науковий вісник НГУ.– Дніпропетровськ: НГУ, 2005.– №7.– С.52-55.
6. Гапеев С.Н. Применение компьютерных моделей для оценки устойчивости протяженных выработок / А.Н. Шашенко, А.С. Штельмах, Ф.А. Караманиц, С.Н. Гапеев // Вісник КТУ: зб. наук. пр.– Кривий Ріг:КТУ, 2005.– Вип. 6.– С.9-13.
7. Гапеев С.Н. Определение напряженно-деформированного состояния породного массива с учетом эффекта разупрочнения в зоне разрыхления / А.Н. Шашенко, А.В. Солодянкин, С.Н. Гапеев // Разработка рудных месторождений. Науч.-техн. сб.– Кривой Рог: Изд-во КрТУ, 2005.– Вып. 88.– С.44-49.
8. Гапеев С.Н. Компьютерная проверка способа предупреждения пучения пород почвы протяженной выработки / А.Н. Шашенко, А.В. Мартовицкий, С.Н. Гапеев // Наукові праці ДонНТУ. Серія: гірничо-геологічна.– Донецьк: ДонНТУ, 2006. –Вип. 96.– С.59-61.

9. Гапеев С.Н. О проблеме исследования геомеханических явлений сопровождающихся большими пластическими деформациями / А.Н. Шашенко, С.Н. Гапеев // Вісник КТУ: зб. Наук. Пр.– Кривий Ріг:КТУ, 2006.– Вип. 12.– С.30-34.
10. Гапеев С.Н. Численное решение упругопластической задачи применительно к устойчивости подземных выработок / А.Н. Шашенко, С.Н. Гапеев // Науковий вісник НГУ.– Дніпропетровськ: НГУ, 2007.– №12.– С.7-12.
11. Гапеев С.Н. Исследование больших деформаций в почве горных выработок / А.Н. Шашенко, А.В. Солодянкин, В.П. Пустовойтенко, С.Н. Гапеев // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2008. - № 1. – С. 20-26.
12. Гапеев С.Н. Моделирование процесса вспучивания пород почвы в протяженных горных выработках / А.Н. Шашенко, А.В. Солодянкин, С.Н. Гапеев // Вісник КТУ: зб. наук. пр.– Кривий Ріг:КТУ, 2008.– Вип. 21.– С.14-19.
13. Гапеев С.Н. Численное моделирование упруго-пластического состояния породного массива вокруг горизонтальной выработки / А.Н. Шашенко, А.В. Солодянкин, С.Н. Гапеев // Известия вузов. Горный журнал. – 2009.– № 4. – С. 89-94 (Наукометрична база РИНЦ).
14. Гапеев С.М. Дослідження проблеми здимування гірських порід із застосуванням апарату теорії стійкості механічних систем: постановка задачі / С.М. Гапеев // Геотехнічна механіка.- Д.: Ін-т геотехнічної механіки НАН України, 2009. – Вип. 82.-С.150-156.
15. Gapiiev S.N. Numerical simulation of the elastic-plastic state of rock mass around horizontal working / A.N. Shashenko, A.V. Solodyankin, S.N. Gapiiev // Archives of mining sciences.– Krakow: AGN Univers.Sci.Tech. of PAS, 2009.– Vol.59.– Is.2.– P.341-348 (Наукометрична база Scopus).
16. Gapiiev S.N. Bifurcational model of rock bottom heaving in mine workings / A.N. Shashenko, A.V. Solodyankin, S.N. Gapiiev // New Techniques and Technologies in Mining.– London, CRC Press/Balkema, 2010.– P.71-76 (Наукометрична база Scopus).
17. Гапеев С.Н. К вопросу обеспечения устойчивости капитальных выработок в условиях ожидаемых больших деформаций приконтурного массива пород / С.Н. Гапеев, А.В. Солодянкин, А.В. Халимендик // Збірник наукових праць НГУ.– Д.: Національний гірничий університет, 2010.– №34, т.2.– С.101-112.
18. Гапеев С.Н. Оценка состояния капитальных наклонных выработок при их комплексном исследовании в шахтных условиях / С.Н. Гапеев, А.Б. Олек-сюк // Науковий вісник НГУ.– Дніпропетровськ: НГУ, 2010.– №3.– С.9-13.
19. Гапеев С.Н. Упруго-пластическая задача плоского деформирования среды с разупрочнением вокруг отверстия круглой формы / А.Н. Шашенко, С.Н. Гапеев // Горный информационно-аналитический бюллетень.– М: Изд-во МГГУ, 2011.– №3.– С.278-282 (Наукометрична база РИНЦ).
20. Гапеев С.М. Імітаційне моделювання деформування неоднорідних гірських порід в умовах контрольованого руйнування / С.М. Гапеев, І.Ю. Старотіторов



// Геотехнічна механіка.- Д.: Ін-т геотехнічної механіки НАН України, 2011. – Вип. 94.-С.31-40.

21. Гапеев С.Н. Рациональный способ крепления подготовительных выработок рамно-анкерной крепью / С.Н. Гапеев, Терещук Р.Н. // Науковий вісник НГУ.– Дніпропетровськ: НГУ, 2011.– №5.– С.54-58.
22. Гапеев С.Н. Определение рационального места заложения вентиляционной магистрали с использованием численных моделей / С.Н. Гапеев, А.Б. Олексюк, А.О. Логунова // Науковий вісник НГУ.– Дніпропетровськ: НГУ, 2011.– №6.– С.60-65.
23. Гапеев С.Н. Численное моделирование структурно-неоднородных горных пород в условиях контролируемого разрушения / С.Н. Гапеев, И.Ю. Старотиторов // Сб. науч. трудов Донбасского государственного технического университета.– Алчевск: ДонГТУ, 2011.– №35.– С.77-87.
24. Гапеев С.Н. Обеспечение устойчивости сопряжений протяженных выработок шахт / А.В. Солодянкин, С.Н. Гапеев, В.В. Раскидкин // Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського.– Кременчук: КрНУ, 2011.– Вип. 5(70).– С.100-105.
25. Гапеев С.Н. Оценка устойчивости протяженных выработок по величине смещений их контура / А.В. Солодянкин, С.Н. Гапеев, А.В. Мартовицкий, В.В. Панченко // Сучасні ресурсоенергосберігаючі технології гірничого виробництва: Науково-технічний журнал.– Кременчук: КрНУ, 2012.– Вип. 1(9).– С.86-92 (Наукометрична база Index Copernicus).
26. Гапеев С.Н. Оценка устойчивости подземных выработок на основе анализа численных моделей / С.Н. Гапеев, И.Ю. Старотиторов // Материалы симпозиума «Неделя горняка-2009»: Горный информационно-аналитический бюллетень.– М: Изд-во МГГУ, 2009.– №1.– С.312-317.
27. Гапеев С.Н. Определение параметров рамно-анкерной крепи в подготовительной выработке в зоне влияния лавы / С.Н. Гапеев, Р.Н. Терещук // Проблемы горного дела и экологии горного производства: Матер. VI Междунар. науч.-практ. конф.– Донецк: Донбасс, 2011.– С.37-43.
28. Гапеев С.Н. Поиск зоны разрыхления в породном массиве в окрестности горной выработки, используя метод конечных элементов / С.Н. Гапеев, И.А. Солодянкин // Новината за напреднали наука –2012: Матеріали 8-ї міжнародної науково-практичної конференції.– София: Изд-во «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2012.– С. 20-21.
29. Гапеев С.Н. Учет макродефектов в статистической модели прочности / Е.А. Сдвижкова, С.Н. Гапеев, А.О. Логунова // Форум гірників – 2013: Матеріали міжнародної конференції.– Дніпропетровськ: НГУ, 2013.– С.175-179.
30. Гапеев С.Н. К вопросу оценки структурного ослабления горных пород при решении задач геомеханики / А.Н. Шашенко, С.Н. Гапеев, А.О. Логунова, Г.Г. Сторчак // Инновационные технологии и проекты в горно-металлургическом комплексе, их научное и кадровое сопровождение: Сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф.– Алматы: КазНТУ, 2014.– С.172-176.

31. Гапеев С.М. Модель породного середовища зі знеміцненням в задачах геомеханіки / О.М. Шашенко, С.М. Гапеев // Доповіді НАН України.– К.: НАН України.– №2.– 2009.– С. 67-72.
32. Гапеев С.Н. Способ повышения устойчивости капитальной горной выработки в условиях больших деформаций контура с применением податливой забутовки / С.Н. Гапеев // Управление устойчивостью протяженных выработок глубоких шахт: Монография / А.Н. Шашенко, А.В. Солодянкин, А.В. Мартовицкий.– Д.: ООО «ЛизуновПрес», 2012.– С.280-309.

**Особистий внесок автора** в роботах, опублікованих в співавторстві: [2] – удосконалення чисельної процедури, калібрування алгоритму на тестових задачах, розробка стохастичної моделі міцності породного масиву; [9] – узагальнення даних за проблемою досліджень; [1, 4-8, 10, 12, 13, 15, 28] – розробка методики чисельних досліджень, обґрунтування чисельних моделей, виконання розрахунків, аналіз результатів; [11, 26, 20, 22, 23] – формулювання ідеї та постановка завдань досліджень, узагальнення та аналіз результатів; [19, 31] – аналітичні дослідження, обробка та аналіз результатів, вирішення тестових задач; [16] – розробка чисельної реалізації алгоритму вирішення пружнопластичної задачі, тестування алгоритму, аналіз результатів; [17] – обґрунтування поняття «великі деформації контуру» стосовно до задачі про напружено-деформований стан геомеханічної системи «гірничя виробка-породний масив», аналіз даних за проблематикою досліджень; [3, 21, 27] – обґрунтування параметрів способу забезпечення стійкості протяжних виробок, аналіз результатів чисельного моделювання; [24, 25] – обробка та аналіз результатів шахтних досліджень; [18] – постановка завдань досліджень, розробка методики натурних спостережень, аналіз результатів; [29] – обґрунтування виду закону розподілу параметрів макродефектів у стохастичній моделі міцності породного середовища; [30] – узагальнення вихідних даних під час постановки завдань, обґрунтування виразу для оцінки масштабного ефекту.

## АНОТАЦІЯ

Гапеев С.М. Моделирование и прогноз геомеханических процессов у выработках глубоких шахт. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.15.09 – «Геотехнічна і гірничя механіка». Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», Дніпропетровськ, 2014.

Робота присвячена удосконаленню методів чисельного моделювання геомеханічних процесів, що розвиваються в структурно неоднорідному породному масиві навколо виробок глибоких шахт, і обґрунтуванню параметрів способів забезпечення їх стійкості. Вперше запропонована методика визначення коефіцієнта структурного послаблення породного середовища з урахуванням випадкової мінливості відстані між тріщинами, що заснована на використанні розподілу Релея як ймовірнісної моделі. Удосконалені підхід до вирішення нелінійних геомеханічних задач, який враховує не тільки ефект розміщення породного сере-

довища, але і його розпушення, та процедура імітаційного моделювання зди- мання порід підосви виробки. Отримав подальший розвиток алгоритм побудо- ви імітаційних повних діаграм позамежного деформування гірських порід. Роз- роблений алгоритм вирішення чисельних задач, який об'єднує в собі пружно- пластичне рішення із розміцненням і розпушенням, імітаційне моделювання зди- мання, отримання кривих позамежного деформування та обґрунтовані пара- метри способів підтримання стійкості протяжних виробок низки глибоких вугі- льних шахт та рудників.

Ключові слова: масштабний ефект в гірських породах, зди- мання порід пі- дошви, повні діаграми позамежного деформування, імітаційне моделювання, нелінійна структурна чисельна модель.

## АННОТАЦІЯ

Гапеев С.Н. Моделирование и прогноз геомеханических процессов в вы- работках глубоких шахт. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.15.09 – «Геотехническая и горная механика». Государствен- ное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», Днепро- петровск, 2014.

Работа посвящена усовершенствованию методов численного моделиро- вания геомеханических процессов, развивающихся в структурно-неоднородном породном массиве в окрестности горных выработок глубоких шахт, и обосно- ванию параметров способов обеспечения их устойчивости.

На основе статистической теории прочности впервые предложена мето- дика определения коэффициента структурного ослабления породной среды с учетом изменчивости расстояния между трещинами, основанная на использо- вании распределения Релея как вероятностной модели случайного расстояния между трещинами.

При выполнении моделирования на эквивалентных материалах процесса пучения пород почвы протяженной выработки установлено, что угол  $\alpha$  накло- на слоев пород в модели заметно влияет на величину и характер смещений по- род в почве выработки при одной и той же величине  $\lambda$  (отношение боковой нагрузки к вертикальной); максимальные смещения и наибольшая интен- сивность развития смещений почвы имеет место при угле наклона слоев  $45^{\circ}$  неза- висимо от величины  $\lambda$ ; при  $\lambda=0,75$  и  $1,0$  максимальные смещения при любых углах наклона слоев  $\alpha$  оказываются по величине довольно близкими (разница не превосходит 7%), а при  $\lambda=1,0$  и  $1,25$  – менее, чем на 5%.

Установлено, что величина смещений в почве нелинейно зависит от ко- эффициента бокового распора  $\lambda$  и угла наклона слоев пород и для пластов с уг- лом падения до 15 градусов при значениях  $\lambda=0,75\div 1,25$  отличается в пределах 7%, что позволяет упрощать без потери точности расчетные схемы геомехани- ческих задач для выработок, находящихся в таких условиях, принимая  $\lambda=1$ , и получать адекватные решения при разработке способов обеспечения устойчи- вости выработок.

Натурные наблюдения за развитием процесса пучения в протяженных горных выработках, выполнявшиеся с целью подтверждения полученных на физических моделях выводов, проводились в капитальных и подготовительных выработках на шахтах «Белозерская» ГП «Добропольеуголь» и им. В.М. Бажанова ГП «Макеевуголь». Детальный анализ полученных зависимостей показал, пучение во времени зависит от горно-геологических условий, развивается по одному и тому же закону вида  $u = a(1 - e^{-bT})$ , где  $u$  – смещения контура,  $T$  – время измерений,  $a$ ,  $b$  – коэффициенты аппроксимации, и может иметь либо затухающий, либо незатухающий характер.

При решении задач геомеханики с разупрочнением и разрыхлением введена гипотеза соответствия, заключающаяся в том, механические явления, происходящие при «жестком» разрушении породного образца в режиме заданных деформаций соответствуют процессам, протекающим при деформировании произвольного единичного объема породного массива в окрестности горной выработки. При этом роль «жесткого» нагружающего устройства играет упруго деформирующаяся область породной среды, расположенная за областью неупругих деформаций.

Предложен подход к решению нелинейных геомеханических задач структурного анализа, учитывающий, в отличие от ранее разработанного подобного подхода, не только эффект разупрочнения породной среды, но и её разрыхления, что позволяет получать решения таких задач, достаточно адекватные не только в части результатов по напряжениям, но и в части смещений.

Усовершенствована процедура имитационного моделирования явления пучения пород почвы протяженной выработки, позволяющая учесть этапы истории развития смещений и рассматривающая напряженно-деформированное состояние, формирующееся при развитии пучения, как дополнительное по отношению к НДС, полученному на этапе упругопластического решения геомеханической задачи. В основу процедуры имитационного моделирования положено представление о пучении как о потере упругопластической устойчивости геомеханической системы «выработка-породный массив».

Разработана процедура получения на численных моделях полных диаграмм запредельного деформирования образцов горных пород. Данная методика является усовершенствованием известного алгоритма имитационного моделирования испытания образцов и позволяет получать полные диаграммы с достаточной для численного моделирования точностью.

Разработан алгоритм, объединяющий в себе подходы упругопластического решения с учетом разупрочнения и разрыхления, имитационного моделирования пучения, получения кривых запредельного деформирования на численных моделях, адекватность которого доказана решением тестовой задачи и сравнением ее результатов с точным аналитическим решением – отклонение в части напряжений составило 0,4%; отклонение в части смещений составило 7,86%. Данный алгоритм положен в основу разработанной комплексной методики оценки НДС геомеханической системы «породный массив-выработка».

Реализация разработанных в диссертации решений осуществлена на шахте «Шахтерская-Глубокая» ГП «Шахтерскантрацит» с ожидаемым экономическим эффектом 23,3 тыс. грн. на 1000 п.м.; на шахте «Комсомольская» ГП «Антрацит» с ожидаемым экономическим эффектом свыше 120 тыс. грн. на 1000 п.м.; на шахте «Родина» ОАО «Криворожский ЖРК» с ожидаемым экономическим эффектом 260 тыс. грн. на 1000 п.м., а также при выполнении научно-исследовательских работ на ряде шахт Донбасса, в учебном процессе ГосВУЗа «Национальный горный университет» при подготовке специалистов и магистров по специальности «Строительство шахт и подземных сооружений» и в научной деятельности, включая подготовку аспирантов.

Ключевые слова: масштабный эффект в горных породах, пучение пород почвы, полные диаграммы запредельного деформирования, имитационное моделирование, нелинейная структурная численная модель.

### ABSTRACT

Gapieiev S.N. Modeling and prediction of geomechanical processes in the workings of deep mines. – Manuscript.

A thesis for scientific degree of Doctor of Technical Sciences by specialty 05.15.09 – «Geotechnical and Rock mechanics». State Higher Educational Institution «National Mining University», Dnipropetrovsk, 2014.

The thesis is devoted to the improvement of numerical modeling of geomechanical processes that develop in structurally inhomogeneous rock mass around excavations in deep mines, and substantiation parameters of ways to ensure their sustainability.

The technique of determining the coefficient of structural weakening of the rock environment considering the variability of the distance between the cavities, that based on the use of the Rayleigh distribution as a probabilistic model of random distance between cavities is proposed for the first time.

An approach to solving nonlinear geomechanical problems, that takes into account not only the effect of loss of strength rock environment, but its loosening and procedure of simulation modeling heaving rock ground excavation were improved. The simulation algorithm to obtain complete diagrams of limiting deformation of rock samples was further developed. The algorithm of solving numerical problems, which combines elastic plastic solution of loss of strength and loosening, simulation heaving, getting beyond the deformation curves and reasonable options means maintaining stability workings extended series of deep coal mines and mines was developed.

Keywords: scale effect in rocks, heaving rock ground full of diagrams of limiting deformation, simulation, nonlinear structural numerical model.

Гапєєв Сергій Миколайович

МОДЕЛЮВАННЯ І ПРОГНОЗ ГЕОМЕХАНІЧНИХ  
ПРОЦЕСІВ У ВИРОБКАХ ГЛИБОКИХ ШАХТ

(Автореферат)

Підп. до друку 29.10.2014. Формат 60x90/16.  
Папір офсет. Ризографія. Ум. друк. арк. 1,9.  
Обл.-вид. арк. 1,9. Тираж 120 пр. Зам. №129.

Державний вищий навчальний заклад  
«Національний гірничий університет»  
49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19