

## ДОСВІД МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗРУШЕНЬ ТОВЩІ І ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ НА ПЛАТФОРМІ FLAC3D

*В.Г. Гриньов, В.В. Назимко, Інститут фізики гірничих процесів НАН України, Україна*

*М.Е. Гордієнко, Донбаська паливно-енергетична компанія, Україна*

*Н.А. Колеснік, Донецький національний технічний університет, Україна*

Показано, що платформа FLAC3D дає можливість врахувати всі суттєві особливості незворотних процесів, які супроводжують зрушення товщі і земної поверхні під час їх підроблення довгим очисним вибоєм: особливості динаміки розвитку зон з позамежним станом, несиметричність зони повних зрушень та динамічної мульди осідань внаслідок врахування залежності параметрів зрушень від часу.

**Вступ.** Відпрацювання родовищ корисних копалин супроводжується розвитком руйнувань в підробленому масиві гірських порід. Процес розвитку руйнувань є досить складним і на сьогоднішній день вивчений не повністю. Досить детально встановлені параметри зон зрушень над довгими очисними вибоями при розробці вугільних родовищ [1-3] та камерами, які відпрацьовують з випуском руди. Основні параметри зон зрушень товщі досить добре вивчені в статистиці, коли процес зрушень в основному завершився, а підроблена товща прийшла в рівновагу.

Розвиток параметрів зрушень на динамічній стадії деформування мульди вивчено менше, а динаміка зон позамежного стану товщі, наносів та ґрунту майже не досліджувалась. Проте перехід порід, наносів та ґрунту в позамежний стан є критично важливим, оскільки саме такий стан є найбільш небезпечним з точки зору інтенсифікації газовиділення, підтоплення, руйнування наземних об'єктів та екологічних проблем.

Найбільш достовірно і детально позамежний стан масиву гірських порід визначається за допомогою математичних моделей. Достовірність результатів моделювання забезпечують шляхом налаштування параметрів розрахункових моделей на основі порівняння модельних результатів з даними натурних інструментальних спостережень за проявами гірського тиску. Найпопулярнішим інструментом для моделювання геомеханічних процесів став метод скінчених елементів [4]. Останнім часом створено ряд комплексних програм для аналізу суцільних та дискретних середовищ, які комбінують переваги різних математичних методів і можуть досліджувати механічні, гідравлічні, термодинамічні, та електродинамічні поля. Однією з таких програм є платформа FLAC3D, що є спеціалізованим інструментом для вирішення вказаних типів задач в галузі геомеханіки [5]. Вказана платформа має кілька суттєвих переваг перед відомими програмними пакетами і, перш за все, велику кількість різноманітних моделей міцності масиву гірських порід і ґрунтів (таких моделей є 12+).

У даній роботі наводиться досвід моделювання динамічного процесу зрушення масиву порід та осідання земної поверхні під час відходу лави від монтажної камери. Саме цей етап розвитку очисних робіт є найбільш критичним з точки зору динаміки зрушень і трансформації мульди на земній поверхні.

**Обґрунтування розрахункової схеми.** Для моделювання процесу зрушень товщі гірських порід використовувалась тривимірна розрахункова схема. Методом скінчених різниць обчислюються похідні при розв'язанні системи диференціальних рівнянь, які описують динаміку зрушень у формі другого закону Ньютона і залежностей між напруженнями і деформаціями, а також граничний стан гірської породи [5].

Основні диференціальні рівняння руху масиву гірських порід записуються у наступному вигляді:

$$\frac{\partial \sigma_{i,j}}{\partial x_i} + \rho b_i = \rho \frac{dv_i}{dt}$$

де  $\sigma_{i,j}$  – нормальні та дотичні напруження, що діють у масиві гірських порід, Па;

$x_i$  - координати декартової системи, м;

$\rho$  – уявна щільність гірських порід, кг/м<sup>3</sup>;

$b_i$  – питомі сили, що розвиваються в масиві гірських порід, і приводяться до одиниці його маси Н/кг;

$v_i$  - швидкість руху елементарних обсягів масиву гірських порід, м/с;

$t$  - час, с.

Якщо права частина дорівнює нулю (з точністю до похибки чисельних обчислень), настає статична рівновага масиву гірських порід. В іншому випадку породи перебувають у стані активних зрушень, що супроводжується кінцевою швидкістю переміщень на контурі виробки й у виробленому просторі. Чим швидше рухається лава, тим далі від рівноваги масив. Швидкість і прискорення процесів зрушень і перерозподілу напружень і деформацій враховується у явному вигляді похідною по часу у диференційному рівнянні. Технічно швидкість посування очисного вибою враховується числом ітерацій, які застосовується при рішенні диференційного рівняння на кожному етапі посування. При розв'язанні системи диференціальних рівнянь використовується сучасна модель міцності гірських порід, заснована на теорії Кулона-Мора, яка модифікована врахуванням орієнтованої системи тріщинуватості (наприклад нашарування та кліважу). При цьому враховується процес дилатансії порід після руйнування і залежність величини розуцільнення від середнього рівня стиснення. Це дає можливість реалістично моделювати процес нелінійного деформування вміщуючих порід, включаючи ділянку позамежного деформування і розуцільнення породи.

Нижче наведений приклад відповідних розрахунків. Товща представлена осадовими породами, в яких частка шарів пісковиків становить 20-25%, алевролітів 30-40%, вапняків 2-4%, вугілля 1%, решта аргіліти. Прийнято горизонтальне залягання порід, для того, щоб вплив часу на зрушення товщі досліджувати в чистому вигляді. Потужність пласта 1,45 м. Глибина відпрацювання лави 480 м. Довжина лави 200 м, а величина відходу від монтажної камери 200 м. Саме після відходу лави на таку відстань процес зрушення стабілізується, а його параметри суттєво не змінюються. Розраховувалася симетрична половина області (права частина лави, якщо дивитися услід лаві, рис. 1). Відстань до дна розрахункової області від пласта становила 200 м. Бічні межі розрахункової області відстояли на 50 м від передбачуваної (згідно Правил [1-3]) межі мульди осідань.

Властивості порід наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 - Механічні властивості масиву гірських порід

Група порід	Модуль пружності, ГПа	Модуль зсуву, ГПа	Кут внутрішнього тертя, град	Зчеплення, МПа	Межа міцності на розтяг, МПа	Кут дилатансії, град
Підощва	15,33	10,2	30	5	2	8
Вугільний пласт	5,6	3,9	34	0,3	1	8
Породи покрівлі	8,7	6,0	28	2	1,5	5
Наноси	0,5	0,34	18	0,2	0,4	4

Лави здійснює п'ять посувань по 40 м. Кожне посування відбувається протягом 6 діб. Це означає, що моделювалася швидкість посування лави, що дорівнює 200 м/міс. Приріст посування лави, рівний 40 м узгоджується з кроком обвалення основної покрівлі, що

дозволяє врахувати цей важливий процес зрушень. Управління покрівлею здійснювалося шляхом її повного обвалення. Було здійснено 6 послідовних моделювань. Кожне наступне моделювання враховувало результати попереднього як початкові умови. На першому моделюванні визначались геостатичні напруження недоторканого масиву та прирівнювались нулю зрушення, обумовлені осіданням розрахункової схеми під власною вагою. Таким чином лава відпрацьовувалась у напруженому власною вагою масиві, а історія навантаження передавалась від задачі до задачі. Це гарантувало достовірність і точність результатів моделювання завдяки коректному врахуванню початкових станів системи, що важливо у випадку необоротних зрушень.

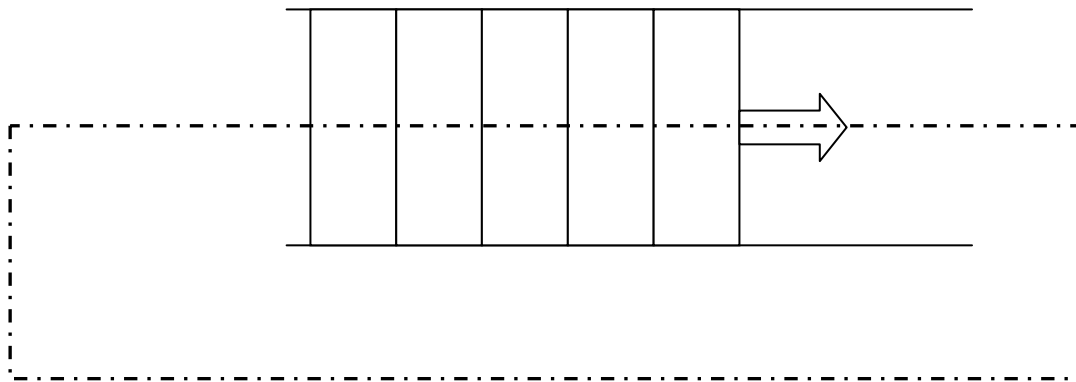


Рис. 1. Розрахункова схема у плані, обмежена штрих пунктиром

**Аналіз результатів моделювання.** На рис. 2 показаний розподіл вертикальної компоненти напружень навколо виробленого простору у вертикальному перерізі, який перетинає середину лави і співпадає з напрямом її посування. Видно виражену зону розвантаження 1, яка розповсюджується в основному у бік покрівлі пласта і в меншій мірі у підшву. Попереду очисного вибою, який рухається виникла контрастна зона динамічного опорного тиску 2, яка прилягає безпосередньо до робочого простору діючої лави. Коефіцієнт концентрації вертикальної компоненти напружень перевищує 2,0. Позаду монтажної камери сформувалась зона залишкового опорного тиску 3, концентрація у якій дещо менша, а сама зона розташована на відстані 5-10 м від стінки монтажної камери, що обумовлено релаксаційними процесами, які протягом місяця розповсюдились біля нерухомої стінки монтажної камери. Результати розподілу гірського тиску добре узгоджуються з відомими теоретичними рішеннями (рис. 2, б) [10], або експериментальними даними (рис. 2, в) [11].

Розподіл вертикальної компоненти зрушень масиву навколо виробленого простору у вертикальному перерізі А-А, який проведений через його середину і паралельний лінії очисного вибою, наведений на рис. 3,а. Товща під пластом залишається нерухомою, а під виробленим простором здимається на незначну величину, що обумовлено деформаціями розвантаження. Підроблена товща осідає над виробленим простором у вигляді аркоподібного склепу, що також укладається у добре відомі уявлення про закономірності зрушення товщі навколо довгого очисного вибою.

Максимальні осідання земної поверхні спостерігаються у центрі мульди (переріз А-А на рис. 3) і становлять 250 мм. Згідно розрахунку за Правилами [1-3] вони складають 0,249 м, і практично співпадають з тими, що отримані на моделі (табл. 2).

Таблиця 2 - Визначення максимальних осідань згідно Правил [1-3]

		D/H	Dп/H	Dв/H	Dр/H	N1	N2	Макс. осідання
Глибина, м	480	0,4167	-0,1	-0,1	0,2167	0,45	0,45	0,249
Довжина лави, м	200							
Товщина пласта, м	1,45							

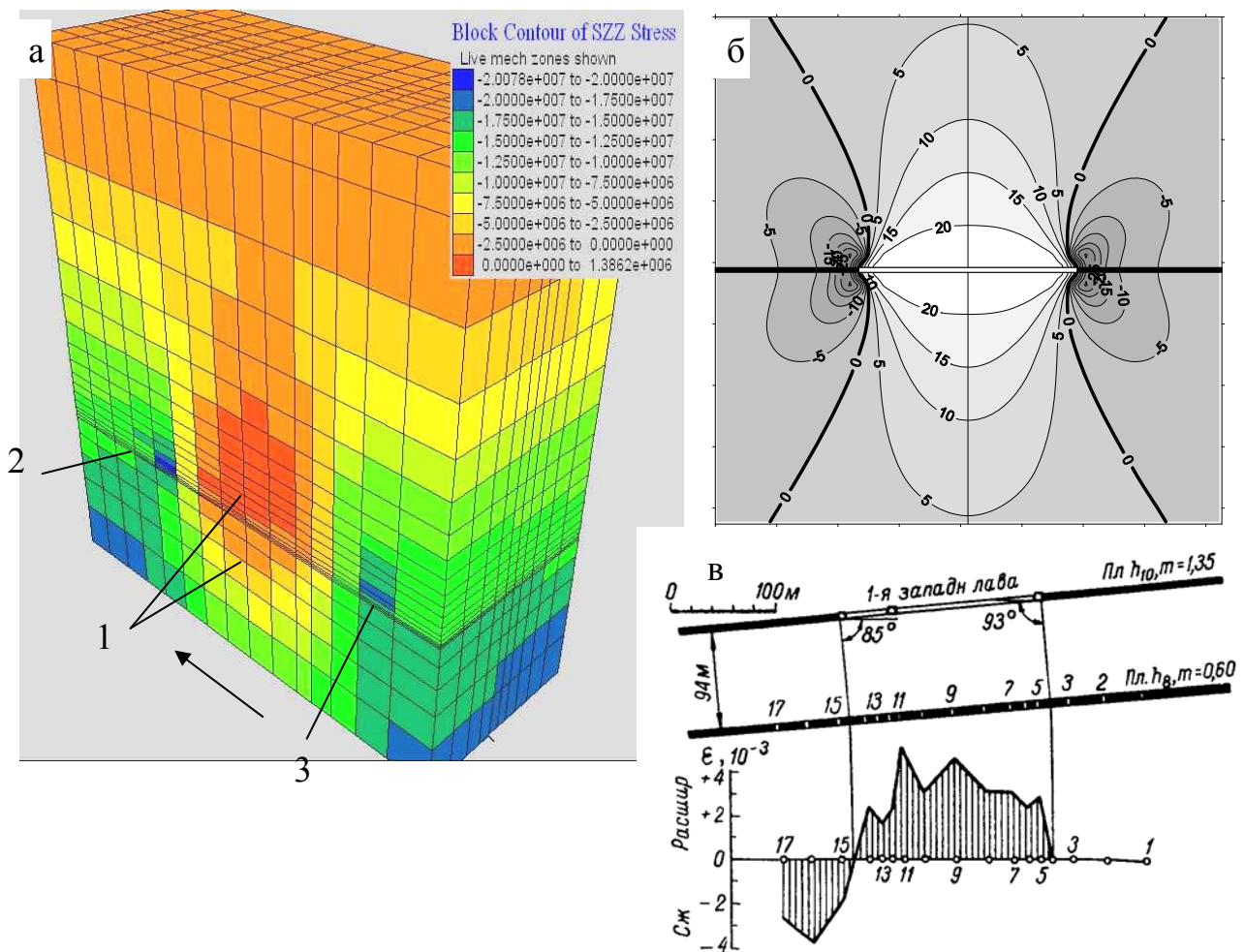


Рис. 2. Розподіл вертикальної компоненти гірського тиску при відході лави від монтажної камери на 200 м (а); результати розрахунку вертикальної компоненти гірського тиску [10] (б); графік деформацій пласта  $h_8$  в результаті надробки його пластом  $h_{10}$  на шахті ім. газети "Соціалістичний Донбас" за даними Петухова І. М. [11] (в)

Проте більшої уваги заслуговує той факт, що крутизна нахилів краю мульди біля нерухої межі виробленого простору (з боку монтажної камери) помітно більша, ніж коло рухої, тобто біля очисного вибою, що переміщається. Це наочно помітно на рис. 3,б по більшій щільності ізоліній осідань над монтажною камерою у порівнянні з більш розлогими ізолініями над очисним вибоєм.

Така особливість мульди є закономірною, оскільки кут повних зрушень біля нерухої межі виробленого простору повинен бути більшим, ніж кут повних зрушень біля очисного вибою, що рухається. Те ж саме стосується й нахилів мульди. Пояснення такого ефекту базується на основі фактору довговічності порід або, іншими словами, різниці умовно миттєвої межі міцності породи і довготривалої. Іншими словами, породні шари не можуть утворювати такі довгі консолі над нерухою межею виробленого простору, як над рухоною, яка зміщується у просторі і оголює все нові, й нові шари порід, які підроблюються. Достовірність вказаної закономірності підтверджується натурними інструментальними спостереженнями за осіданнями земної поверхні в умовах американських (рис. 4) [9], та турецьких вугільних шахт [8]. Так, нахили країв мульди над нерухою межею виробленого простору більші у 2-4 рази за нахили краю мульди над вибоєм, що рухається зі швидкістю 300 – 500 м на місяць. Наголосимо, ефект різних нахилів країв мульди зрушень тим помітніше, чим швидше рухаються лави й міцніше породи та наноси. В умовах слабких

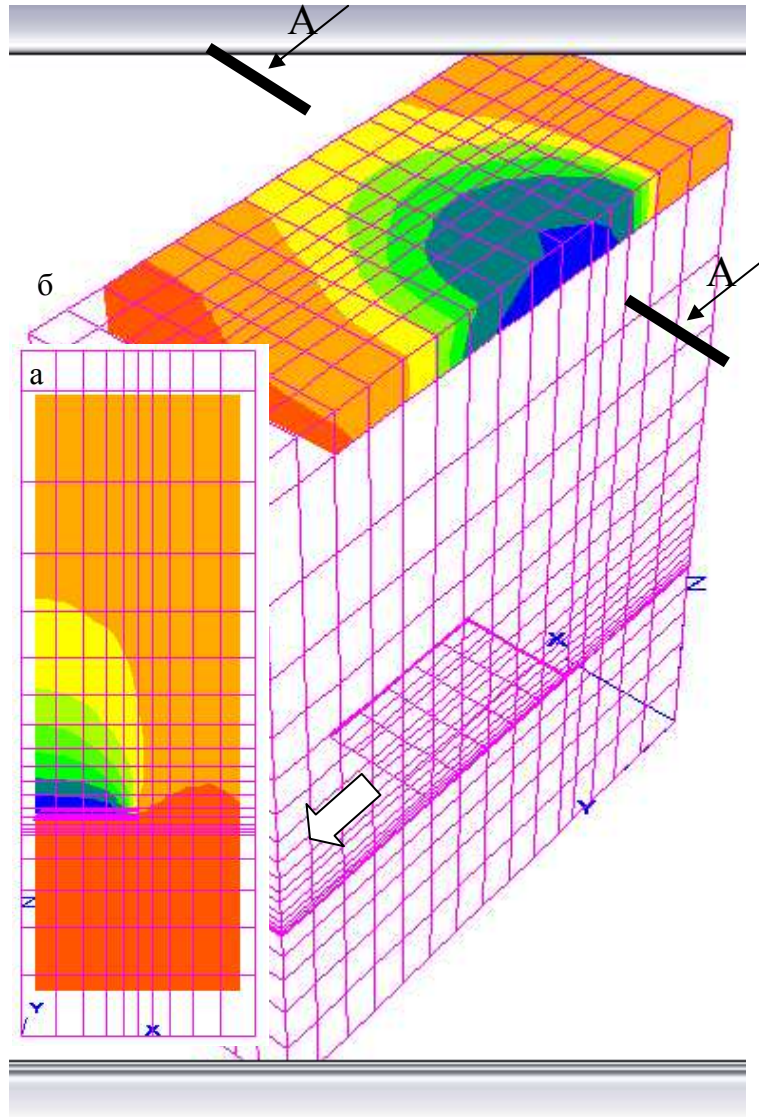


Рис. 3. Розподіл вертикальної компоненти зрушень (а) у перерізі А-А, та вид правої половини мульди осідань (б)

порід Західного Донбасу цей ефект встановити важче, але зі збільшенням швидкостей посування лав він, ймовірно, буде зареєстрований у майбутньому.

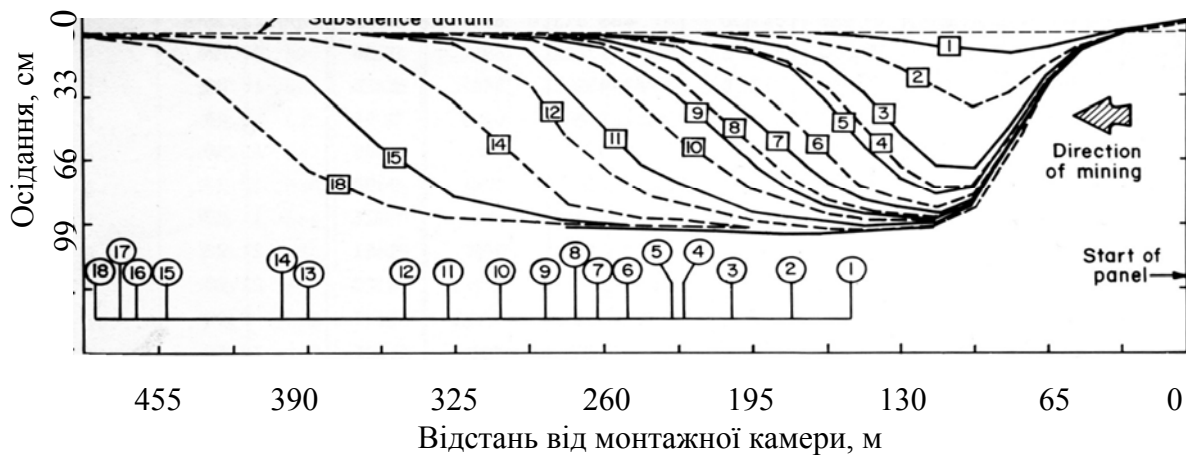


Рис. 4. Динаміка мульди осідань з посуванням лави [9]

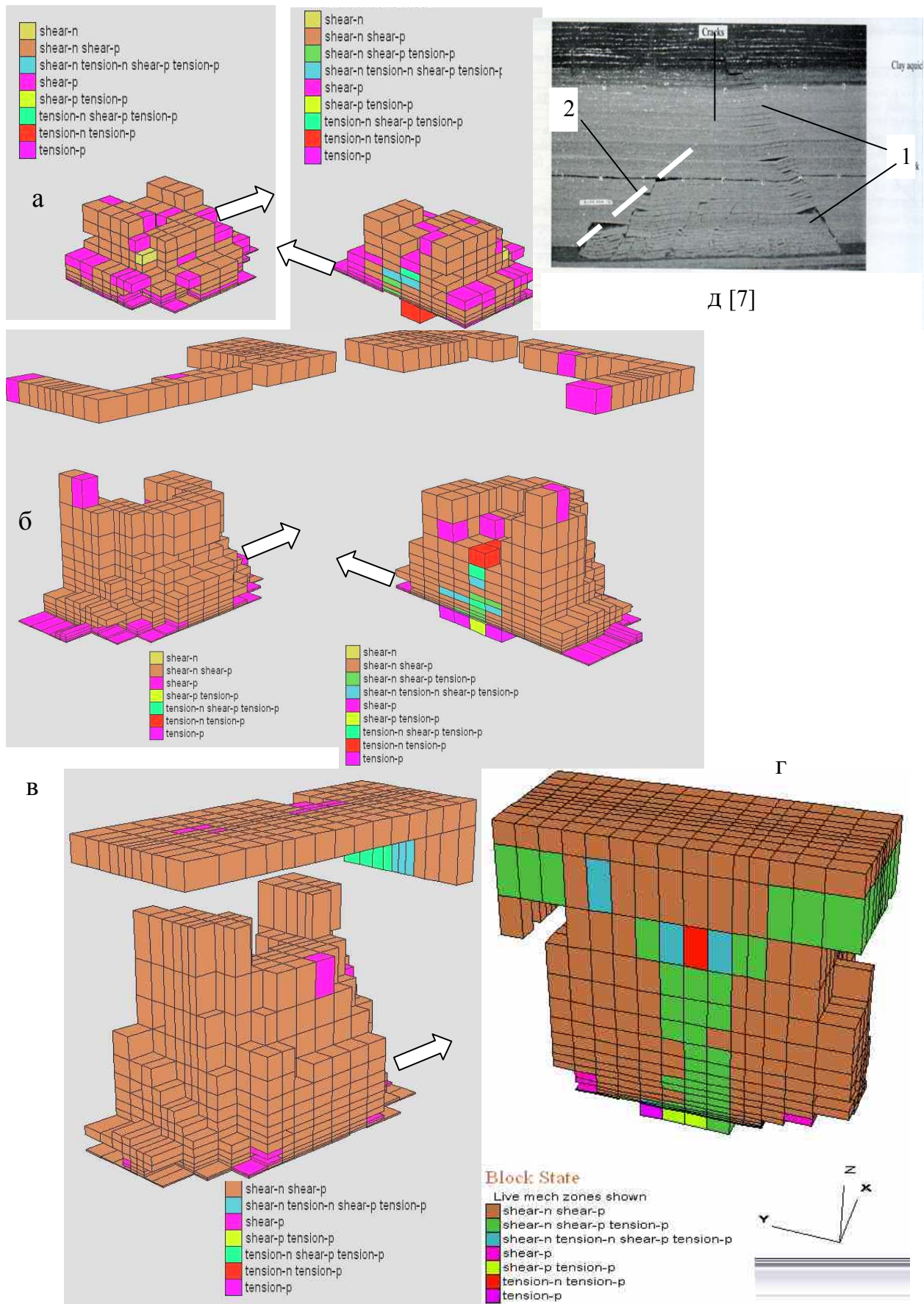


Рис. 5. Розвиток зони повних зрушень за умов відходу лави на 120м (а), 160м (б) і 200м (в) відповідно; (г) – після зупинки лави; (д) – на фізичній моделі [7]

Аналіз динаміки розвитку зон повних зрушень узгоджується з динамікою параметрів мульди зрушень на земній поверхні. Так на рис. 5 показано як розширюється зона повних зрушень з відходом лави від монтажної камери на певну відстань. Видно, як зона повних зрушень розвивається спочатку у товщі, що підроблюється, а з запізненням по мірі збільшення розмірів виробленого простору у позамежний стан переходить і частина підошви під центральною частиною виробленого простору. Для наочності конфігурації зон повних зрушень показано з різних боків, а стрілками вказано напрямок руху очисного вибою. Кут нахилу площини повних зрушень з боку нерухомої границі виробленого простору у 1,3-1,5 рази більше, ніж біля лінії очисного вибою, який рухався (фрагменти а-в рис. 5).

Фрагмент (д) рис. 5 наочно підтверджує достовірність встановленої закономірності, оскільки усереднений кут нахилу площини 2 повних зрушень над лінією очисного вибою помітно більше ніж кут нахилу площини 1, яка прив'язана до нерухомої границі виробленого простору. Вказана закономірність отримана на фізичній моделі [7]. Аналогічний висновок отриманий у [6]. Фрагмент (г) рисунку 5 показує, як кути нахилу площин повних зрушень вирівнюються після зупинки лави і витримки часу протягом 6 місяців. Це додатково підтверджує висновок про суттєвий вплив довговічності масиву гірських порід на асиметричність мульди зрушень на земній поверхні та зон повних зрушень у товщі, яка підроблюється очисним вибоєм, що швидко рухається.

Ще одна закономірність раніш не була зафіксована і стосується особливостей розвитку зон позамежного стану на поверхні мульди. Фрагменти (б) рис. 5 показують, як у позамежний стан спочатку переходять ґрунти і наноси на периферійних частинах мульди. Лише після злиття кільця периферійних позамежних зон процес руйнування розповсюджується до центру мульди і охоплює її основну площу (фрагменти в, г). Цей ефект має логічне пояснення, оскільки саме на периферійних частинах мульди діють максимальні деформації горизонтального розтягування та кривизни. Втім модель свідчить про те, що основну роль у процесі переходу наносів і ґрунтів у позамежний стан відіграють критичні дотичні деформації, а не деформації розтягування. Такий висновок дає можливість уточнити параметри фундаментів та заходи щодо їх посилення у зонах підробки земної поверхні очисними вибоями.

**Висновки.** Програмна платформа FLAC3D має переваги у порівнянні з іншими програмними пакетами, що використовуються у геомеханіці, оскільки має дванадцять моделей міцності і дозволяє точніше врахувати особливості процесу зрушень, які залежать від часу. Моделювання процесу зрушення масиву гірських порід навколо очисного вибою, який рухався зі швидкістю 200 м/міс, дозволив встановити наступні ефекти. Концентрація залишкового опорного тиску позаду монтажної камери менша за концентрацію у зоні динамічного опорного тиску попереду лави, що рухається. Крутизна нахилів краю мульди біля нерухомої границі виробленого простору (з боку монтажної камери) помітно більша, ніж біля рухомої, тобто біля очисного вибою, який рухається. Кут нахилу площини повних зрушень з боку нерухомої границі виробленого простору у 1,3-1,5 рази більше, ніж біля лінії очисного вибою, який рухався. У процесі відходу лави від монтажної камери в позамежний стан спочатку переходять ґрунти і наноси на периферійних частинах мульди. Лише після злиття кільця периферійних позамежних зон процес руйнування розповсюджується до центру мульди і охоплює її основну площу. Вказані особливості є наслідком залежності довговічності породи від швидкості її навантаження і відображають необоротні геомеханічні процеси, що супроводжують відпрацювання очисних вибоїв.

#### Список літератури

1. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. – М.: Недра, 1981. – 288 с.
2. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. – СПб., 1998.
3. Правила підробки будівель, споруд і природних об'єктів при видобуванні вугілля підземним способом: ГСТУ 101.00159226.001: 2003. - [Введ. 01.01.2004]. – К., 2004. – 128 с.
4. Zienkiewicz, O.C.; Taylor, R.L.; Zhu, J.Z. (2005). The Finite Element Method: Its Basis and

Fundamentals (Sixth ed.). Butterworth-Heinemann. ISBN 0750663200.

5. FLAC3D Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions. Itasca, 2008.

6. Назимко И. В. Исследование влияние скорости подвигания очистного забоя на характер деформирования покрывающих пород / И. В. Назимко // Вісник КТУ. – 2006. – Вип. 5(15). – С. 41 – 45.

7. Huang Q. Physical simulation of overburden movement and stability //Proc. 25th Int. Conf. on Ground Control in Mining. Morgantow, WVU, 2006.-Pp.439-443.

8. Aksoy C.O., Kose H., Onargan T., Koca y. and Heasley K. Estimation of limit angle using laminated displacement discontinuity analysis in Soma coal field, Western Turkey/ International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, vol. 41, pp. 547-556.

9. Peng S.S. Surface Subsidence Engineering, Littleton, Colo.: Society for Mining, Metallurgy, 1992, 161 p.

10. Планировка горных работ при отработке свит выбросоопасных угольных пластов / В. И. Черняев, М. П. Зборщик, Н. Н. Грищенко, Б. И. Нестеренко; Донец. гос. техн. ун-т. - Донецк, 1998. - 141 с.

11. Теория защитных пластов/Сост. И.М.Петухов и др. .-М.: Недра, 1976.-224с.

## **О НЕОБХОДИМОСТИ НОВОЙ НАУЧНОЙ КОНЦЕПЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ УГОЛЬНЫХ ШАХТ**

*В.Ю. Медяник, ГВУЗ «Национальный горный университет», Украина*

Рассмотрены вопросы проектирования отработки запасов угля и освещен прогноз на будущее. Проведена систематизация подходов, методов и методик по проектированию и планированию горных работ на новых горизонтах. Предложены итоговые программы проектирования угольных шахт.

С уменьшением мировых цен на уголь, необходимо предпринять шаги, которые обеспечат жизнеспособность новых и эффективность уже работающих горнодобывающих предприятий. Сейчас угольная промышленность проходит через фазу спада в горнодобывающем цикле из-за отсутствия политической стабильности и гарантированного сбыта углей шахт, в котором трудно рассчитывать на долгую и спокойную стратегию развития, и появляются мысли о том, как можно помочь отрасли, как можно уменьшить потери.

В горнодобывающих отраслях промышленности суть коренных перемен в будущем, при переходе к рынку, заключается в перенесении центра внимания с количественных показателей на качество и эффективность, с промежуточных – на конечные результаты, с расширения производственных фондов – на их обновление, с наращивания топливно-сырьевых ресурсов – на улучшение их использования, на всемерное повышение технического уровня и качества продукции. Поэтому перед горнодобывающей промышленностью во весь рост встают проблемы планирования более полного и комплексного использования всех полезных ископаемых, пустых пород от подготовительных работ, отходов обогащения и воды, а также уменьшения землеемкости добычи и рекультивации земель, как это отметили авторы [1-3].

Разработка проектов, или проектирование, сводится к осуществлению этого особого вида деятельности, которая направлена на решение комплекса взаимосвязанных задач технико-технологического, архитектурно-строительного, социально-экономического и экологического характера. Проектирование горных предприятий включает в себя определение целей и оценку эффективности реализации проекта, конструирование целесообразных (в конкретных горно-геологических условиях) экологически приемлемых вариантов технологической схемы и оптимизацию их параметров, расчет