

**В. О. ДРИБАН, В. О. КАНІН**, доктори техн. наук, **В. Р. ШНЕЕР**, канд. техн. наук  
(УкрНДМІ НАН України)

**В. Г. ГРІНЬОВ, Г. П. СТАРІКОВ, Е. П. ФЕЛЬДМАН**, доктори техн. наук  
(ІФГП НАН України)

**П. С. ПАШКОВСЬКИЙ**, доктор техн. наук  
(НДІГС «Респіратор»)

**С. М. СМОЛАНОВ**, канд. техн. наук (ДВГРС)

**О. С. БЕШТА**, чл.-кор. НАН України, **В. І. САМУСЯ**, доктор техн. наук  
(Національний гірничий університет)

# Забезпечення техногенної та екологічної безпеки при розробці вуглегазових родовищ (теорія і практика)\*

Контактна інформація: [vlkanin@yandex.ru](mailto:vlkanin@yandex.ru)

**Р**озвиток України, її незалежність, економічна і політична стабільність багато в чому зумовлені наявністю і мірою використання власної паливно-енергетичної бази. Історично в нашій країні склалася така ситуація, що серед визначальних елементів паливно-енергетичного комплексу найпріоритетнішою є вугільна галузь.

Максимального видобутку вугілля в Україні в обсязі 218,2 млн т було досягнуто в 1976 р. З 1977 р. почалося щорічне падіння вуглевидобутку і зниження обсягів проведення розкривних і підготовчих виробок, тому що у другій половині 70-х років основні фінансові і матеріальні кошти спрямовувалися на розвиток видобутку відкритим способом, а відносно Донбасу створювалася громадська думка, що надалі видобуток у цьому регіоні є неперспективним. Унаслідок такої політики вугільна промисловість України, яка десятиріччями формувала гігантську індустрію, що забезпечувала паливом Європейську частину СРСР і половину державної потреби у вугіллі марок, що коксуються, опинилася з масою соціальних проблем і найстарішим (у СНД) шахтним фондом. За повоєнний період у Донбасі було реконструйовано менше третини шахт.

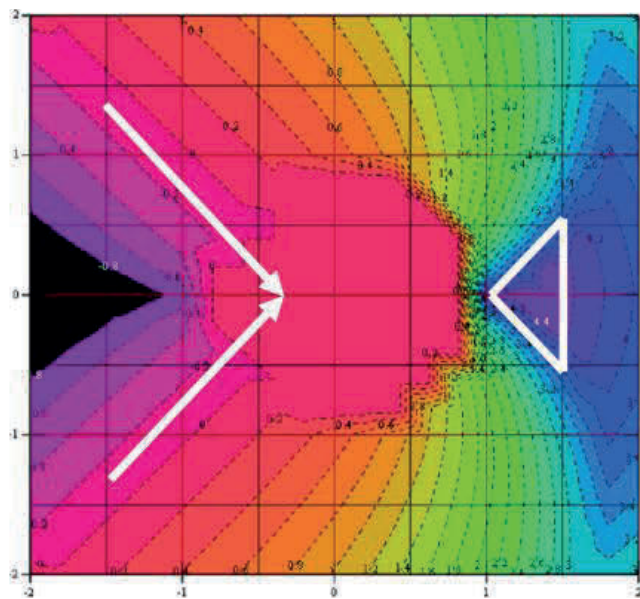
До цього слід додати і постійне ускладнення гірничо-геологічних умов, пов'язане зі збільшенням

глибини гірничих робіт і залученням до розроблення найскладніших в експлуатації вугільних пластів. До кінця 80-х років порівняно з 1976 р. збільшилися кількість лав з нестійкою покрівлею більш ніж на 40 %, кількість лав з геологічними порушеннями, що неможливо подолати, і покрівлею, що складно обвалюється, на 30 %. У 1,3 раза зросла кількість шахтопластів, що є небезпечними щодо раптових викидів вугілля та газу. Якщо з 1960 по 1976 р. в Донбасі було зареєстровано 2210 викидів вугілля і газу, то в 1977–1990 рр. їх кількість зросла до 3560. З 1996 по 2010 р. на шахтах України зареєстровано 1350 обрушень породи, 78 вибухів і спалахів газу, 985 газодинамічних явищ.

Сучасні вугільні підприємства є високомеханізованими, з розвиненою електричною мережею і великою кількістю машин і механізмів. Із зростанням енергооснащеності шахт збільшується вірогідність виникнення підземних пожеж, пов'язаних із застосуванням електроенергії. Підземні пожежі виникають несподівано і продовжуються певний час до їх ліквідації. Продукти горіння, що утворюються, взаємодіють з повітряним потоком і поширюються по гірничих виробках. У результаті формується група виробок, в яких містяться небезпечні для людини шкідливі речовини, – зона поширення отруйного газу.

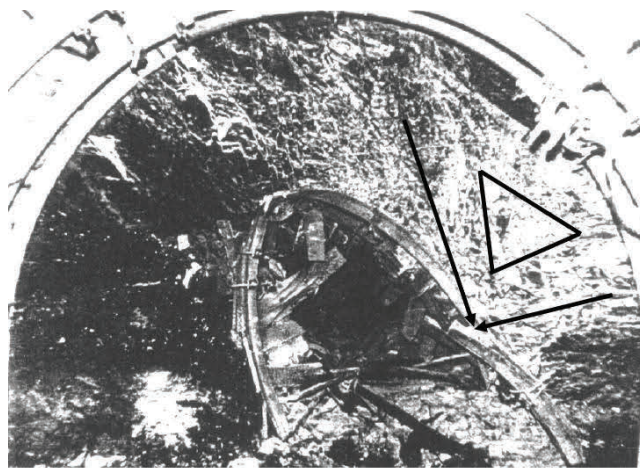
Окрім створення небезпечних умов праці під час підземного розроблення вуглегазових родовищ, видобуток вугілля зумовлює також величезне техно-

\* Розглянуто основний зміст, наукові положення та практичні результати колективної роботи, яку удостоєно Державної премії України в галузі науки і техніки 2013 р. (Указ Президента України від 23 серпня 2014 р. № 675/2014).



**Рис. 1.** Ізолінії збурень нормальних головних напружень навколо круглої виробки на стадії втрати стійкості.

генне та екологічне навантаження на довкілля. З початку XIX ст. до теперішнього часу із надр Донецького басейну вилучено понад 11 млрд т вугілля і не набагато менше – породи. Треба зазначити, що під час відроблення тільки однієї лави розмірами 200×1000 м на глибині 1000 м із надр вилучається лише 390 тис. т вугілля, у процесі зрушення гірського масиву бере участь до 1,5 млрд т порід. Негативний вплив видобування вугілля підземним способом характеризується також нерівномірними деформаціями земної поверхні: розтягом чи стиском, кривиз-



**Рис. 2.** Втрата стійкості реальної гірничої виробки, що супроводжується формуванням «клину втискування» з утворенням ядра перем'ятих ущільнених порід.

ною опуклості чи угнутості та утворенням уступів, які порушують сталу взаємодію будівель з їхньою основою, що призводить до деформацій і ушкоджень конструкцій. Останніми роками проблема експлуатації будівель у вугільних регіонах України суттєво загострилася через ненадійність сучасних методів прогнозу їх технічного стану при деформаціях земної поверхні від впливу гірничих виробок і тривалій відсутності ремонтно-відновлювальних робіт. Оскільки за короткий час здійснити захист усіх деформованих будівель майже неможливо, особливої актуальності набуває наукове обґрунтування можливості та умов їх подальшої експлуатації.

Виходячи з наведеного, можна зробити висновок, що сталий розвиток галузі неможливий без вирішення зазначених надзвичайно актуальних проблем, для чого автори вказаної роботи запропонували підхід, за якого на підставі фундаментальних досліджень вперше комплексно пов'язані механізми формування та еволюції напружено-деформованого стану гірських порід, процеси метанотворення і масоперенесення, які відбуваються в гірничому масиві під час видобутку вугілля. Це дало змогу розробити науково обґрунтовані способи активного управління напружено-деформованим станом гірських масивів; оптимальні параметри очисних вибоїв; методи прогнозування зон підвищеної газонасиченості; технології та засоби ефективного закріплення нестійких гірських масивів; інженерні рішення, що забезпечують надійну експлуатацію будівель і споруд; спеціальні мобільні системи для аварійно-рятувальних робіт.

Сутність усіх способів розробки корисних копалин як виду інженерної діяльності людини полягає в утворенні в масиві гірських порід порожнин різних форм і розмірів. Це призводить до порушення природного напруженого стану масиву з виникненням ділянок підвищених і знижених напружень і протіканням у них деформацій порід з різною швидкістю й інтенсивністю, перетворенням окремих ділянок масиву із суцільного в незв'язане сипке чи дискретне блокове середовище і зрушенням або обвалюванням порід у порожнини (виробки) аж до заповнення і утворення на земній поверхні мульд, зсувів і провалів.

Найявні методи прогнозування й оцінювання параметрів напружено-деформованого стану товщі гірських порід – це набір розрізних методик розрахунку окремих видів деформацій, що застосовуються, як правило, в обмежених умовах конкретних регіонів. Відсутність єдиного підходу до прогнозування всього комплексу геомеханічних процесів, які супроводжують видобуток вугілля, досить часто

є причиною помилкового оцінювання наслідків деформування масиву гірських порід на стан об'єктів.

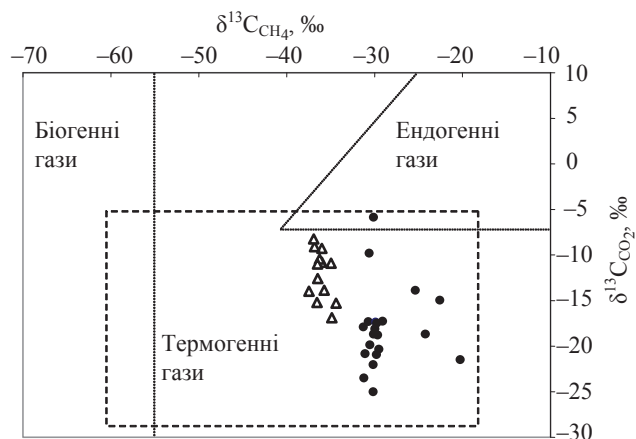
У роботі показано, що в процесі деформації масив навколо гірничих виробок послідовно проходить дискретний ряд рівноважних станів, які відповідають певному співвідношенню фізико-механічних властивостей вміщуючих порід і рівню гірського тиску. Це кардинально змінює уявлення щодо перерозподілу напружено-деформованого стану в гірському масиві. Вперше встановлено, що процес втрати стійкості виробки ініціюється формуванням і поперемінним втискуванням двох клиновидних ділянок вміщуючого масиву.

Розроблена модель формування зони незворотних деформацій дає змогу аналізувати збурення полів напружень під час переходу від одного дискретного рівноважного стану до наступного. Останній етап еволюції напружено-деформованого стану – збурення полів напружень, що спричинює втрату стійкості. На рис. 1 чітко виділяється яскраво виражений «клин втискування» з кутом 90–100° (виділений білими стрілками) і додатково можна відзначити сферу ущільнення (перем'ятих порід), яка виділена трикутником, де перепад нормальних головних напружень стиснення становить більше чотирьох радіусів виробки. Тоді зміщення контуру виробки, як правило, перевищує 500 мм. Ця теоретична модель цілком підтверджується практичними результатами (рис. 2).

Найбільш непередбачувані у вугільних шахтах – вибухи метану. Однією з причин вибухів, за інших однакових умов, є аномальні виділення горючих газів у гірничі виробки. Природа цих аномалій досить різноманітна, проте найбільш небезпечним вважається непрогнозоване і неконтрольоване виділення газів глибинного походження, у тому числі важких вуглеводнів. Зазначимо, що межі вибухонебезпеки таких сумішей із повітрям значно нижчі, ніж метану. Важкі вуглеводні сприяють зниженню температури спалаху метаноповітряної суміші і «розмиванню» меж її підживання.

У роботі теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено тезу, що у вугільних шахтах, окрім метану, який генетично пов'язаний з вугільними пластами й органічною речовиною, що розсіяна у вміщувальних породах, трапляється також метан і інші вуглеводні (термогенні й ендогенні) глибинного походження (рис. 3).

Метан глибинного походження по глибинних розломах, розломах кристалічного фундаменту й тектонічних порушеннях в осадовій товщі мігрує в гірський масив, що розробляється, і формує в ньому зони аномального скупчення газів. Ці зони можна

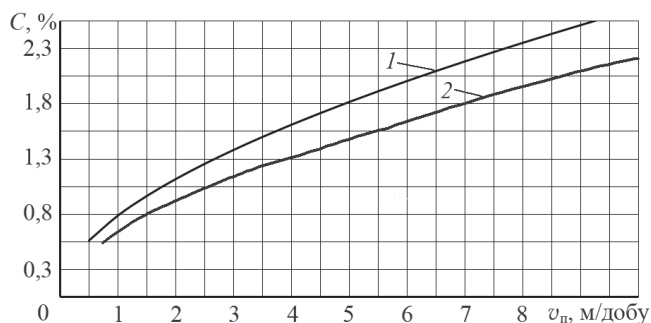


**Рис. 3.** Розподіл ізотопного складу вуглецю метану і вуглекислого газу у пробах газу шахт ім. О. Ф. Засядька (1) і «Червонолиманська» (2) на генетичній діаграмі в координатах  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  -  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ : 1 ●; 2 ▲.

розглядати, з одного боку, як зони формування небезпечних скупчень метану, в яких найвірогідніше вияви газодинамічних явищ, а з іншого – як джерела довготривалого видобутку вуглеводневих газів у шахтах.

Характерними чинниками формування зон аномального скупчення газів є комплекс геологічних умов, що визначають закритість надр і схоронність підвищеного ступеня газонасиченості вугленосних відкладень газом вільної фази. Геохімічними критеріями наявності міграції у вугільні шахти газів глибинного походження є вміст гелію (більше 0,001–0,030 %) та ізотопний склад вуглецю метану  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  не менше мінус 2,88 ‰.

Враховуючи подальше погіршення гірничо-геологічних умов і зростання навантажень на очисні вибої, високу актуальність має проблема діагностики фактичної газонасиченості привибійної зони вугільних



**Рис. 4.** Залежність концентрації метану в очисному вибої від швидкості посування лави: 1 і 2 – при максимальному та мінімальному значенні коефіцієнта дифузії метану з вугілля.





**Рис. 5.** Шахтний вимірювач масопереносу метану ШВММ (ДС-03).

пластів. Нормативні методи і засоби за прогнозом характеру та інтенсивності газовиділення в шахтах через невисоку достовірність і низьку надійність цю проблему не вирішують. Тому варто відмовитися від середніх значень, а замість них ввести поточне значення – тиск метану у вугіллі та ефективний коефіцієнт дифузії – й контролювати ці параметри спеціальними вимірювальними пристроями на глибину добового просування вибою, що дасть змогу коректувати навантаження на очисний вибій за газовим чинником.

Для реалізації цього напряму досліджено процеси масоперенесення метану у вугіллі. Встановлено, що кінетика виділення газу з тріщин, що розкриваються під час проходження хвилі розвантаження, прямо пропорційна розміру тріщин та зворотно пропорційна кількості метану у вугіллі і коефіцієнта ди-



**Рис. 6.** Комп'ютерна схема гірничих виробок (фрагмент плану ліквідації аварії).

фузії, при цьому швидкість виходу метану із сорбційного об'єму вугілля на два порядки перевищує швидкість хвилі розвантаження. На підставі цих результатів надано оцінку ефективності технології видобутку вугілля за часом формування небезпечної концентрації у вихідному струмені повітря. Уперше виявлено, що за інших однакових умов головним параметром, який характеризує оптимальний видобуток вугілля, є коефіцієнт масоперенесення метану у вугіллі  $D_f$ , рівень якого змінюється від  $10^{-4}$  до  $10^{-14}$  м<sup>2</sup>/с. Цей коефіцієнт треба визначати під час проведення підготовчих виробок по пласту: при  $D_f < 10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с швидкість посування очисного вибою обмежується технічними можливостями видобувної техніки; при  $D_f > 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с – об'ємом повітря. Розроблено спосіб визначення допустимого навантаження на очисний вибій (рис. 4) і шахтний вимірювач масопереносу метану ШВММ (рис. 5).

Під час підземних пожеж отруйні речовини з повітряним потоком поширюються по виробках. Перехід на аварійний режим провітрювання – єдиний спосіб для рятування людей. З метою оперативного розв'язання задач провітрювання підземних об'єктів у аварійних умовах розроблено комплекс програм «Вентиляція шахт», який дає змогу: моделювати пожежі; кількісно визначати теплову депресію пожежі; розраховувати зони загазування; визначати стійкість вентиляційних режимів в умовах ліквідації аварії; розробляти комп'ютерні версії плану ліквідації аварій (рис. 6).

Розроблено метод скорочення термінів ізоляції підземних пожеж за допомогою створення контуру рециркуляції продуктів горіння. Суть його полягає в багатократній подачі газової суміші з малою часткою кисню, що сприяє припиненню горіння, перерозподілу теплоти по довжині виробки і прискоренню ліквідації пожежі більш ніж утричі.

Розроблено методи стабілізації провітрювання шахти в умовах дії теплової депресії пожежі, визначено ефективність кожного методу і сферу їх застосування. Аналіз архівних матеріалів показав, що в минулому столітті часто спостерігалися випадки масової загибелі людей у шахті через дію теплової депресії пожежі. Внаслідок упровадження результатів досліджень останні 15 років не було зафіксовано жодного такого випадку.

У вугільній промисловості України вірогідність аварій унаслідок обвалень гірських порід (16,9 %) займає третє місце після аварій, що пов'язані з газодинамічними явищами (28 %), але за абсолютними значеннями смертельного травматизму «обвали й обвалення породи» є основними травмувальними чинниками. Тому для безпечного видобутку вугілля

підземним способом в умовах поширення нестійких порід розроблено вітчизняну скріплювальну суміш СКАТ, яку за усадкою, адгезією і міцністю на стискання порівнюють з кращими зарубіжними сумішами. Водночас вона має меншу в'язкість, токсичність і вартість. Її адгезійна міцність визначається наявністю функціональних груп з високою реакційною здатністю – карбоксильних, амідних і гідроксильних, здатних до відтворення міжфазних хімічних зв'язків, і становить 3,5–5,4 МПа. Незначний вміст метиленефірних зв'язків, під час розкладання яких виділяється формальдегід, забезпечує її низьку токсичність, міцність на одноосне стиснення через 2–3 год після початку твердіння 10–12 МПа, через добу – 32–44 МПа, через 5 діб – понад 60 МПа. Зразки роздроблених порід з додаванням 5 % суміші СКАТ закріплюються до 73–78 % міцності на одноосне стиснення непорушених зразків. Скріплювальну суміш СКАТ і технологію зміцнення порід впроваджено на п'яти шахтах.

Вдосконалено методичні положення щодо відпрацювання захисних пластів у напрямі підвищення ефективності їх використання для запобігання раптовим викидам вугілля, породи, газу і гірським ударами та встановлення мінімальних розмірів ціликів вугілля, що дало змогу значно знизити непродуктивні витрати без зниження безпеки гірничих робіт. З 1995 р. ці положення лягли в основу більш ніж 90 рекомендацій з безпечного ведення гірничих робіт на вугільних шахтах.

З урахуванням досліджених закономірностей деформування будівель на підроблених територіях створено метод визначення допустимих та граничних умов їх експлуатації на засаді деформаційного ресурсу. На підставі досвіду і даних натурних спостережень встановлено допустимі за умов експлуатації та граничні за умов безпеки значення максимального розкриття тріщин у зовнішніх стінах житлових, громадських і виробничих будівель. Запропоновано класифікацію технічного стану будівель на підроблених територіях та розроблено систему локальних і загальних заходів щодо підвищення залишкового деформаційного ресурсу будівель, які призначають залежно від їх технічного стану і прогнозованого впливу деформацій земної поверхні. Ці заходи впроваджено в проекти і рекомендації з підробки житлових, громадських і виробничих будівель міст Донецьк, Горлівка, Кіровське, Жданівка, селищ Шевченко і Удачне, сіл Дмитрове і Новоукраїнка Донецької області; міст Соснівка і Червоноград Львівської області; міст Суходільськ і Молодогвардійськ та села Самсонівка Луганської області, що забезпечило ви-



**Рис. 7.** Використання мобільної підйомної установки під час ліквідації наслідків аварії на шахті ім. Карла Маркса ДП «Орджонікідзевугілля».

добування вугілля з гарантією безпеки підроблених будівель.

Потреба створення мобільних підйомних установок з автономним енергопостачанням зумовлена аваріями, що мають місце на людських підйомах та в шахтних стволах. Це призводить до неможливості забезпечення своєчасної евакуації шахтного персоналу під час несправностей стаціонарних підйомних машин і стволового обладнання, які важко усунути, а також під час тривалого зникнення електроенергії на підземному підприємстві. Для вирішення цього завдання створено універсальну аварійно-рятувальну мобільну підйомну установку (АСППУ-6,3), до складу якої входять пересувна підйомна машина, копрові шківні та універсальна кліть. Вона забезпечує спуск-підйом людей, матеріалів і устаткування під час аварійно-рятувальних робіт у шахтах глибиною до 1400 м. Головний зразок установки АСППУ-6,3 виготовлено Новокаматорським машинобудівним і Донецьким експериментальним ремонтно-механічним заводами (рис. 7).

Результати впровадження розробок авторів роботи дали змогу отримати соціальний ефект завдяки підвищенню безпеки праці, досягти сумарного економічного ефекту в розмірі 218 млн грн шляхом своєчасної локалізації аварійних ситуацій, видобути близько 5 млн т вугілля під забудованими територіями без порушення будівель і споруд.