

ГІПОТЕЗА ЩОДО ФІЗИКО-ХІМІЧНОЇ ПРИРОДИ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ЯВИЩ У ВУГІЛЬНИХ ШАХТАХ

¹Безручко К.А., ¹Бурчак О.В., ¹Приходченко С.Ю., ¹Слободяникова В.К.

¹Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України

HYPOTHESIS ABOUT PHYSICAL-CHEMICAL NATURE OF GAS-DYNAMIC PHENOMENA IN COAL MINES

¹Bezruchko K.A., ¹Burchak O.V., ¹Prykhodchenko S.Yu., ¹Slobodiannikova V.K.

¹Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of NAS of Ukraine

ГИПОТЕЗА ОТНОСИТЕЛЬНО ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

¹Безручко К.А., ¹Бурчак А.В., ¹Приходченко С.Ю., ¹Слободяникова В.К.

¹Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины

Анотація. Практичний досвід розробки газонасиченого вуглепородного масиву, а також результати наукових досліджень вказують на недосконалість існуючих уявлень щодо процесів у вкрай напруженому вуглепородному масиві, механізмів виникнення та протікання газодинамічних явищ (ГДЯ).

Проведений аналіз стану проблеми щодо природи і механізму раптових викидів вугілля, порід та газу, в цілому засвідчив, що викиднебезпечність обумовлена складною взаємодією трьох головних природних чинників (напруженого стану, газового фактору та фізико-механічних властивостей гірських порід) з технологічними, а формування викиднебезпечних умов відбувається в геологічних середовищах, які характеризуються певними властивостями та станом.

Метою роботи є розробка нових теоретичних уявлень про природу ГДЯ, з урахуванням геологічних умов та впливу зовнішніх чинників, шляхом розробки гіпотези щодо фізико-хімічної природи ГДЯ.

Доведено, що розвантаження пласта від напружень, що виникли в молекулярній структурі під впливом геологічних чинників призводить до активації релаксаційних процесів в речовині. Наслідком релаксації системою накопиченої енергії є структурні перетворення з виділенням низькомолекулярних з'єднань. За цією схемою відбувається формування газонасиченості вуглепородного масиву за рахунок газів генетично пов'язаних з викопною органічною речовиною та розв'язання газодинамічних явищ.

Сутність гіпотези полягає у тому, що часткове розвантаження вуглепородного масиву створює у тріщинуватих зонах вугільного пласта умови для релаксації пружної енергії, накопиченої в молекулярній структурі вугілля, яка сприяє активації структурних перетворень за вільно-радикальним механізмом, наслідком чого є виділення низькомолекулярних з'єднань (зокрема метану). За відповідних умов в зоні релаксації пружних деформацій процес може набути лавиноподібний характер, тобто ініціювати раптовий викид вугілля та газу.

За фізико-хімічною моделлю метановиділення у кам'яному вугіллі під впливом геомеханічних, геологічних та техногенних факторів, що пропонується у рамках цієї роботи, часткове розвантаження створює у вугільному пласті умови для релаксації пружної енергії накопиченої в молекулярній структурі вугілля. Тобто сприяє активації структурних перетворень за вільно-радикальним механізмом, наслідком яких є виділення низькомолекулярних з'єднань (метану). За умови достатньо високої тріщинуватості зони пружних деформацій процес набуває лавиноподібного характеру, тобто розвивається раптовий викид вугілля та газу.

Ключові слова: вугілля, вугільні шахти, газодинамічні явища, викиди вугілля та газу, напружено-деформований стан

Запаси вугілля в Українській частині Донбасу складають приблизно 56,7 млрд. т., а ресурси метану у вуглепородній товщі, за різними оцінками, коливаються від 12 до 25 трлн. м³ [1]. Проте темпи розвитку галузі стримують складні умови видобутку на газовугільних родовищах, які погіршуються зі збільшенням глибини розробки, та висока газонасиченість вугільних пластів і порід.

При розробці покладів вугільний метан є одночасно як причиною низки проблем, пов'язаних з безпекою ведення гірничих робіт, зокрема, з прогнозом та запобіганням газодинамічним явищам в шахтах, так і потенційним джерелом дефіцитного енергоносія. Газодинамічні явища – суфляри, прориви газу, раптові викиди порід, вугілля та газу – призводять до найбільшої економічної та соціальної шкоди. Ліквідація наслідків раптових викидів у вугільних шахтах знижує темпи проведення видобувних робіт та потребує додаткових витрат, що веде до здорожчення кінцевої собівартості енергоносіїв.

Причинами газодинамічних явищ вважаються потенціальна енергія напруженого стану масиву та прояви гірського тиску у поєднанні з газовим фактором та фізико-механічними властивостями порід. Практичний досвід розробки газонасиченого вуглепородного масиву, а також результати наукових досліджень вказують на недосконалість існуючих уявлень щодо процесів у вкрай напруженому вуглепородному масиві включно з розв'язанням газодинамічних явищ. В першу чергу це пов'язано з недостатнім вивченням процесів, які відбуваються у вугільній речовині на нанорівні під впливом геомеханічних, техногенних та інших факторів.

Закордонні та вітчизняні фахівці займаються вивченням гірничо-геологічних умов та механізмами виникнення раптових викидів. Найбільш активно, на даний час, дослідження з вирішення проблеми раптових викидів ведуться у таких вугледобувних країнах як Китай [2–10], Росія [11–17], Австралія [18–19], Туреччина [20], Канада [21]. Створено безліч прогнозних динамічних моделей, які враховують напружений стан гірського масиву, тиск газу, міцність шару, проникність вугілля й інші геолого-фізичні фактори. Приділяється увага впливу тектонічних деформацій на деякі геохімічні властивості вугілля та її зв'язок з викидами. Досліджується поява кільцевого поясу низької проникності навколо викидонебезпечної зони з тиском газу на кілька порядків вище за фоновий, що також може бути причиною викиду. Вивчається склад та походження газів, процеси сорбції-десорбції із твердою матрицею як у вугіллі, так і в гірських породах. Приділяється увага механохімічним перетворенням вугілля, які можуть спровокувати раптові викиди.

Необхідно відзначити, що переважна кількість робіт присвячені вивченню не причин газодинамічних явищ, а їх наслідків. А оскільки природа викидів дотепер достеменно не відома, то точність прогнозу розглянутих моделей не є високою. Встановити дійсну причину газодинамічних явищ неможливо без урахування властивостей речовини, у якій вони відбуваються. Вочевидь, необхідне застосування нового підходу щодо питання дослідження фізичної, а можливо і хімічної природи викидів, заснованого на встановленні взаємозв'язку між складом і атомно-молекулярною структурою компонентів речовини, з одного боку, та геологічними умовами разом з геохімічними процесами з іншого.

За період розробки вугільних родовищ вітчизняними та закордонними фахівцями запропоновано низку гіпотез механізмів виникнення та протікання

газодинамічних явищ (ГДЯ) у вуглепородних масивах. На даний час відомо понад 150 гіпотез, що намагаються пояснити механізм протікання газодинамічних явищ. Всі вони можуть бути розділені на три групи, що відрізняються чинниками, яким відводиться визначальна роль в розв'язуванні газодинамічних явищ: гіпотези, які засновані на провідній ролі газу, гіпотези, що базуються на домінуючій ролі тиску та гіпотези, що трактують механізм газодинамічних явищ як багатопараметричний. Більшість сучасних гіпотез пояснюють механізм виникнення ГДЯ двома основними факторами:

а) напруження, що виникають унаслідок гірського тиску, ведуть до розтріскування і розпушування вугілля поблизу забою виробки, зменшення міцності зі зміною газопрпусної здатності;

б) газ, що міститься у вугіллі, є додатковим чинником, який обумовлює виконання частини роботи, що необхідна для відриву і переміщення вугілля, порід та газу, причому швидкість виділення газу залежить від якості вугілля, його пористості, тріщинуватості та структури.

Обидва ці фактори діють одночасно, ініціюючи газодинамічне явище.

В роботах [22, 23] на підставі сучасних концепцій нерівноважної термодинаміки сформульовано фізичну модель газодинамічних явищ у вугільному пласті. За цією моделлю в основі прояву ГДЯ лежить екзотермічна реакція теплового вибуху за нестационарною теорією теплового вибуху М.М. Семенова.

Проведений аналіз стану проблеми щодо природи і механізму раптових викидів вугілля, порід та газу, в цілому засвідчив, що викидонебезпечність обумовлена складною взаємодією трьох головних природних чинників (напруженого стану, газового фактору та фізико-механічних властивостей гірських порід) з технологічними, а формування викидонебезпечних умов відбувається в геологічних середовищах, які характеризуються певними властивостями та станом.

Велика кількість гіпотез щодо природи і механізму газодинамічних явищ та їхня концептуальна різноманітність свідчить, що проблема залишається невирішеною, наукове обґрунтування природи і механізму раптового виникнення ГДЯ є недостатнім та потребує подальших ґрунтовних наукових досліджень з метою подальшого вирішення проблеми. Тому дослідження необхідно продовжувати в напрямку вивчення механізмів процесів утворення аномальної кількості газу при викидах, особливостей будови та речовинного складу вугільних пластів на різних масштабних рівнях та дослідженню закономірностей формування структур, з якими просторово і генетично пов'язано утворення зон, небезпечних за газодинамічними проявами.

Метою роботи є розробка гіпотези фізико-хімічної ініціації ГДЯ шляхом узагальнення нових теоретичних уявлень про природу та механізми раптових викидів, з урахуванням геологічних умов та впливу зовнішніх чинників.

Ідея роботи полягає у використанні взаємозв'язку макроскопічних геологічних та геомеханічних чинників з фізичними та фізико-хімічними

процесами, які протікають в структурі органічної та мінеральної речовини, що формують викидонебезпечний стан вуглепородного масиву.

За фізико-хімічною гіпотезою метановиділення у кам'яному вугіллі під впливом геомеханічних, геологічних та техногенних факторів, що пропонується у рамках цієї роботи, часткове розвантаження створює у вугільному пласті умови для релаксації пружної енергії накопиченої в молекулярній структурі вугілля, тобто сприяє активації структурним перетворенням за вільнорадикальним механізмом, наслідком яких є виділення низькомолекулярних з'єднань (метану). За умови достатньо високої тріщинуватості зони пружних деформацій у вугільному пласті процес набуває лавиноподібного характеру, тобто розвивається раптовий викид вугілля та газу [24, 25].

В основу концепції цієї гіпотези покладено наступні тези.

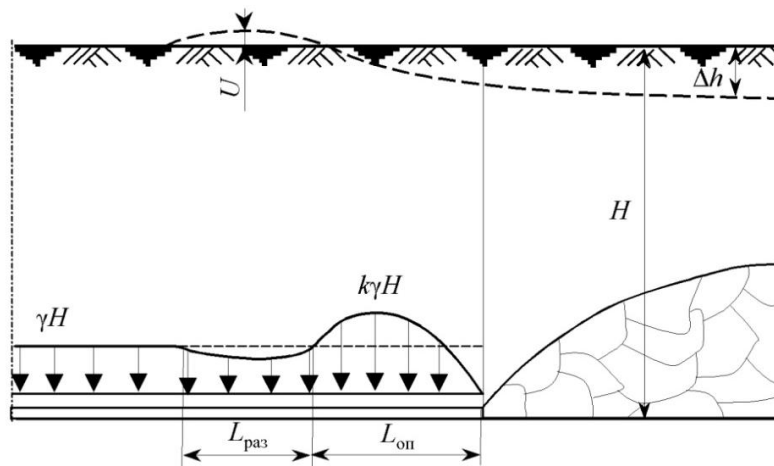
1. Вуглепородний масив не є однорідним, а являє собою багатофазне, шарувате, гетерогенне середовище із складним розподілом тектонічних напружень. Внаслідок чого він перебуває у квазірівноважному стані, сутність якого полягає у постійній і послідовній зміні тимчасових станів рівноваги у відповідності до геодинамічних умов, які виникли в цей час у вуглепородному масиві.

В процесі ведення гірничих робіт чи під дією тектонічних сил порушується рівновага системи гірської товщі. При чому ці стани не постійні в часі. Виходячи з загальних уявлень логічно припустити, що всі зміни стану масиву і вугільного пласта, зокрема, мають хвильовий характер. Тобто, якщо є стиснення, то є і розтягування. Наслідком таких процесів може бути утворення та перерозподіл зон стиснення та розтягування. Розглянемо декілька прикладів виникнення та розподілу зон стиснення та розтягування у напружено-деформованому масиві [26, 27].

Часткове розвантаження вугільного пласта, що розробляється і порід його безпосередньої покрівлі може бути обумовлене ефектом важеля, роль якого виконує консоль потужного міцного пісковика основної покрівлі. Точкою опори цього «важеля» є зона пружних деформацій вугільного пласта, розташована попереду вибою лави. Чим потужніше і міцніше породи покрівлі, тим довшу консоль він утворює у виробленому просторі лави і тим більша (і за величиною і за протяжністю) створювана зона часткового розвантаження попереду вибою лави [28, 29].

Підроблений масив гірських порід при переміщенні очисного забою розділяється на ділянки з одночасними, але різними деформаціями: розтягування та стиснення [30]. Інструментальні спостереження, проведені на шахтах ім. К.І. Поченкова та «Героїв Космосу» підтвердили чергування зон підвищеного тиску і розвантаження (деформації стиснення і розтягування) в підробленому масиві гірських порід. При посуванні очисних робіт, масив гірських порід від забою до поверхні періодично відчуває підвищений гірський тиск, який змінюється зоною розвантаження. Ці зони розвантаження і тиску формувалися на відстані близький до кроку обвалення основної покрівлі.

У роботі Б.М. Усаченко та С.І. Скіпочки [31] розглянуто напружено-деформований стан масиву при відпрацюванні потужного гіпсового пласту, для якого також зроблено висновок щодо хвилюподібного характеру формування напружень з зоною розвантаження попереду забою на відстані декількох метрів. Про окремі максимуми та мінімуми концентрації напружень на тлі їх загального зростання зазначено також у роботі [32], де доведено, що за швидкості посування очисного забою більш 60 м/місяць попереду нього формується область знижених вертикальних напружень. Як підтвердження подібного висновку в роботі наведено результати вимірювань вертикальних зміщень земної поверхні. Показано, що на поверхні землі разом з посуванням забою переміщується хвиля підняття ($\approx 0,3$ м), що викликана зависанням над виробленим простором природної консолі (балки), вісь якої спирається на зону опорного тиску. Цей висновок повністю відповідає думці, яка викладена також у роботі Е.І. Кольчика [33]. На рис. 1 наведена схема вертикальних зміщень земної поверхні за цими авторами.



U – величина зміщення земної поверхні; H – глибина відпрацювання пласта;

$L_{\text{раз}}$ – протяжність розвантаженої зони; попереду зони тимчасового опорного тиску;

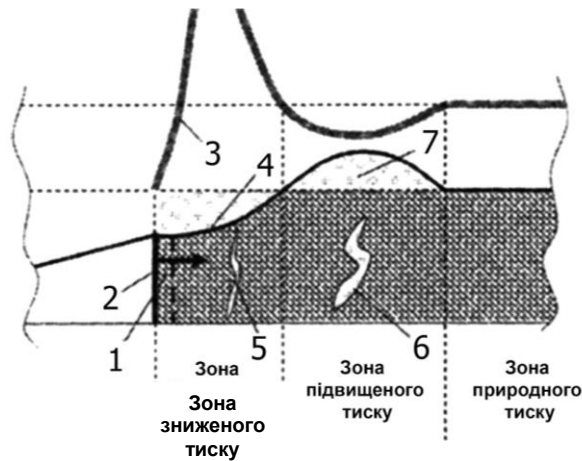
$L_{\text{оп}}$ – зона опорного тиску; γ – середня густина гірських порід; k – коефіцієнт розвантаження

Рисунок 1 – Схема вертикальних зміщень земної поверхні над виробленим простором [33]

Схожа за сутністю схема (рис. 2) утворення зон з різним напружено-деформованим станом масиву, що виникає при посуванні очисного забою, приведена в роботі [34].

В роботі [35] зроблено висновок, що в зоні впливу гірничої виробки також формується осередок можливого виникнення газодинамічного явища, центр якого знаходиться у пласті на відстані ≈ 6 м від забою, а приблизні межі прояву складають 3–10 м від забою. Вказані в цій роботі відстані співпадають з зонами пониженого тиску, що були визначені у вище згаданих публікаціях.

2. Вуглефікована, аморфна, полікомпонентна, гетерогенна, високомолекулярна речовина, якою є кам'яне вугілля є метастабільною, тобто знаходиться у стані локальної рівноваги з низьким енергетичним бар'єром структурних перетворень [36, 37].



1 – віджате вугілля; 2 – поточне положення забою; 3 – крива зміни гірського тиску в зоні впливу очисної виробки; 4 – крива зміни положення покрівлі вугільного пласта під впливом гірського тиску; 5 – частково закрита тріщина; 6 – заповнена флюїдом тріщина; 7 – порожнина, що утворилась в зоні зниженого тиску; **➔** – напрямком посування забою

Рисунок 2 – Утворення зон з різним напружено-деформованим станом масиву, що виникає при посуванні очисного забою [34]

Метастабільний стан – це стан локальної рівноваги з якого система може перейти у більш стійке становище під зовнішнім впливом або самовільно, внаслідок внутрішніх флуктуацій [38]. Принципово важливим є не знаходження системи у стані локальної рівноваги, а спроможність самостійно, у відповідних умовах, подолати енергетичний бар'єр і перейти до нового стану з меншою енергією. Таким чином, метастабільність (стан нестійкої рівноваги) полягає у здатності формувати власну структуру та, відповідно, властивості за рахунок накопиченої пружної енергії.

Наслідком метастабільності вугільної речовини є активність релаксаційних процесів. Під релаксацією того чи іншого параметру розуміють процес самовільного досягнення системою, що складається з великої кількості частинок статистичної (відповідно і термодинамічної) рівноваги, тобто такого стану, за якого параметр, що розглядається приймає постійне значення.

Стану рівноваги за параметром пружної енергії у вуглепородному масиві відповідає гідростатичний напружений стан, при якому всі три основні напруження дорівнюють одне одному. Це означає, що напруження в тілі, яке досягнуло такого стану не релаксуються і можуть зберігатися в системі необмежено довго – доки її рівноважний стан не буде порушений будь-якою зовнішньою дією. Перебудова структури вугілля супроводжується подоланням енергетичних бар'єрів конформаційних переходів та деструктивних вільно-радикальних реакцій з відщепленням від аліфатичної складової твердої фази метільних груп та атомів водню.

Про те, що релаксація енергетичного потенціалу у вигляді ланцюгових вільно-радикальних реакцій – реальний і визначальний механізм перетворень вугілля, свідчить високий вміст у вугільній речовині парамагнітних центрів, тобто вільних радикалів, і зростання їх концентрації у вугільній речовині з підвищенням ступеню метаморфізму [36, 39, 40].

Таким чином, релаксація, тобто зменшення відхилення енергетичного стану системи від рівноважного відбувається за рахунок конформаційних переходів, гомолітичних реакцій розриву молекул (утворення вільних радикалів), ізомеризації, циклізації, поліконденсації з утворенням найбільш термодинамічно стабільних вуглеводневих сполук – метану та циклічних фрагментів [41]. Підтвердженням цих двох напрямів структурних трансформацій вугілля служить активне виділення газу, аж до раптового викиду чи суфляру, і структуризація вуглефікованої органічної речовини до утворення структури антрациту.

Тобто, основні закономірності механохімічних перетворень визначаються процесами релаксації зі звільненням акумульованої енергії. Одержавши якусь кількість енергії, речовина переходить в нерівноважний стан, в якому зовнішні напруги вже не діють, а внутрішні напруження релаксуються самостійно [42]. Принципово важливо, що зовнішні сили, у подібній ситуації, можуть або гальмувати, або прискорювати процеси, створюючи в системі відповідні умови.

В роботах провідних вуглехіміків [39, 40, 43] однозначно показано і доведено, що вугілля – високомолекулярна органічна речовина не регулярної будови (сополімер), на яку розповсюджуються закони організації полімерів. Кількість атомів в одній макромолекулі може сягати десятків та навіть сотень тисяч. Розміри макромолекул обмежуються тільки дисперсністю речовини, відповідно у непорушеному гірському масиві, в умовах довготривалого всебічного стиснення, розміри макромолекул вугілля обмежуються виключно тектонічними порушеннями та включеннями породи.

Органічна речовина вугілля є сумішшю макромолекул нерегулярної будови з різною молекулярною масою. Прийємо у першому наближенні, що в одній макромолекулі вугілля 5000 атомів вуглецю. Тоді макромолекула вітриніту з вмістом вуглецю 81,5 % [39] складатиметься також з 3765 атомів водню, 540 атомів кисню та 65 атомів азоту (без урахування вмісту заліза, сірки, фосфору та інших відносно важких елементів). Відповідно молекулярна маса макромолекули складатиме: $5000 \cdot 12 + 3765 \cdot 1 + 540 \cdot 16 + 65 \cdot 14 = 60000 + 8640 + 910 = 73315$ а.о.м. З молекулярною масою вираженою в атомних одиницях маси (а.о.м.) числено збігається молярна маса, виражена в грам/молях. Відповідно один грам/моль вугілля дорівнює 73315 г/моль або 73,315 кг/моль.

Питома вага вугілля ≈ 1300 кг/м³. Відтак в одному кубічному метрі вугілля $1300/73,315 = 17,73 \approx 18$ молей речовини. Прийємо за [35] розрахункову потенційну енергію пружного стиснення вугілля $W = 0,115$ МДж/м³, або $=115$ кДж/м³.

Відповідно за умови розвантаження масиву, за рахунок енергії пружного стиснення вугілля, в систему може бути вивільнено $115/18=6,4$ кДж/моль, що співпадає з енергією активації конформаційних переходів та вільно-радикальних реакцій 4,2–25,1 кДж/моль [44].

Таким чином розвантаження пласта призводить до активації релаксаційних процесів в речовині. Наслідком релаксації системою накопиченої енергії є структурні перетворення з виділенням низькомолекулярних з'єднань. За цією

схемою за рахунок газів генетично пов'язаних з викопною органічною речовиною відбувається формування газоносності вуглепородного масиву та розв'язання газодинамічних явищ.

Запропонована фізико-хімічна модель полягає у тому, що часткове розвантаження вуглепородного масиву створює у тріщинуватих зонах вугільного пласта умови для релаксації пружної енергії, накопиченої в молекулярній структурі вугілля під впливом геомеханічних, геологічних та техногенних факторів, яка сприяє активації структурних перетворень за вільно-радикальним механізмом, наслідком чого є виділення низькомолекулярних з'єднань (зокрема метану). За відповідних умов в зоні релаксації пружних деформацій процес може набути лавиноподібний характер, тобто ініціювати раптовий викид вугілля та газу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Угледородный массив Донбасса как гетерогенная среда / Булат А.Ф., Звягильский Е.Л., Лукинов В. В. и др. К.: Наук.думка, 2008. 412 с.
2. Baohai Yu., Chengxiang Su., Deming Wang. Study of the features of outburst caused by rock cross-cut coal uncovering and the law of gas dilatation energy release / International Journal of Mining Science and Technology. Vol. 25. Issue 3. May 2015. P. 453–458. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.03.020>
3. Coal and gas outburst dynamic system / Fan Chaojun, Li Sheng, Luo Mingkun and others / Journal of Mining Science and Technology. 2017. Vol. 27 P. 49–55. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2016.11.003>
4. Lu Wei Dong, Ji Ren Wang, Ju Yi Wen. Microscopic Mechanism of Adsorption–Desorption in Coal and Gas Outburst Process / Journal of Nanoscience and Nanotechnology. 2017. Vol. 17, Num. 9. P. 6894–6898. <https://doi.org/10.1166/jnn.2017.14460>
5. The impacts of stress on the chemical structure of coals: a mini-review based on the recent development of mechanochemistry / Quanlin Houa, Yuzhen Hana, Jin Wangb and others / Science Bulletin, Vol. 62, Iss. 13, 2017, P. 965–970. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2017.06.004>
6. Shi, X., Song, D. and Qian, Z. (2017), "Classification of coal seam outburst hazards and evaluation of the importance of influencing factors", Open Geosciences, vol. 9, pp. 295-301. <https://doi.org/10.1515/geo-2017-0024>
7. Wang, Ch., Yang, Sh., Yang, D., Li, X., Jiang, Ch. (2018), "Experimental analysis of the intensity and evolution of coal and gas outbursts", Fuel, vol. 226, 15 August 2018, pp. 252-262. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.03.165>
8. An, F., Yuana, Yu, Chenacd, X., Lia, Z. and Li, L. (2019), "Expansion energy of coal gas for the initiation of coal and gas outbursts", Fuel, vol. 235, 1 January 2019, pp. 551-557. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.07.132>
9. Hou, Ch., Zhang, Y. and Yan, Yi. (2019), "Effects of coal seam dip angle on the outburst in coal roadway excavation", International Journal of Mining Science and Technology, vol. 29, issue 5, September 2019, pp. 757-764. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.08.001>
10. Cao, J., Dai, L., Sun, H., Wang, B., Zhao, B., Yang, X. and Zhao, X. (2019), "Experimental study of the impact of gas adsorption on coal and gas outburst dynamic effects", Process Safety and Environmental Protection, vol. 128, August 2019, pp. 158-166. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.05.020>
11. Зыков В.С., Абрамов И.Л. Уточнение классификации динамических явлений в угольных шахтах / Вестник. 2015. № 3. С. 74–83.
12. Киряева Т.А. Изменчивость физико-химических свойств угольного пласта как признак его повышенной выбросоопасности / Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. № 2. Том 2. С. 8–12.
13. О влиянии форм связи метана с угольной матрицей на газодинамические явления, возникающие при подземной разработке угольных пластов / Смирнов В.Г., Дырдин В.В., Исагилов З.Р. и др. / Вестник. 2017. № 1. С. 34–40. <https://doi.org/10.26631/arc1-2017-34-41>
14. Ларин М.К. Анализ способов и средств прогноза и предотвращения внезапных выбросов угля и газа на угольных шахтах / Вестник Сибирского индустриального ун-та, 2018. № 3 (25). С. 54–57.
15. Колесниченко И.Е., Артемьев В.Б., Колесниченко Е.А. Эволюция методов изучения метанобезопасности при разработке угольных пластов / Уголь. 2019. №7. С. 36–41. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2019-7-36-41>
16. Ларин М.К., Розум И.Г., Бушуев К.И. Виды и причины газодинамических явлений на угольных шахтах / Вестник Сибирского индустриального ун-та. 2019. № 4 (30). С. 25–27.
17. Ганова С.Д., Скопинцева О.В., Исаев О.Н. К вопросу исследования состава углеводородных газов угольных пластов и пыли с целью возможного прогнозирования их потенциальной опасности / Известия Томского политехнического ун-та. 2019. Т. 330. № 6. С. 109–115.
18. Dennis, J. Black (2017), "Investigations into the identification and control of outburst risk in Australian underground coal mines", International Journal of Mining Science and Technology, vol. 27, pp. 749-753. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.07.006>

19. Dennis, J. Black (2019), "Review of coal and gas outburst in Australian underground coal mines", International Journal of Mining Science and Technology, vol. 29, pp. 815-824. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.01.007>
20. Nilufer, K. and Onder, M. (2019), "Application of structural equation modeling to evaluate coal and gas outbursts", Tunnelling and Underground Space Technology, June 2019, vol. 88, pp. 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.02.017>
21. Hou, Ch., Zhang, Y. and Yan, Y. (2019), "Effects of coal seam dip angle on the outburst in coal roadway excavation International", Journal of Mining Science and Technology, vol. 29, pp. 757-764. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.08.001>
22. Булат А.Ф., Дырда В.И. Внезапные выбросы угля и газа в контексте нелинейной неравновесной термодинамики / Уголь Украины. 2013. № 12. С. 24–33.
23. Булат А.Ф., Дырда В.И. Некоторые проблемы газодинамических явлений в угольном массиве в контексте нелинейной неравновесной термодинамики / Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ: ІГТМ НАНУ, 2013. № 108. С. 3–31.
24. Геологические основы и методы прогноза выбросоопасности угля, пород и газа / Булат А.Ф., Лукинов В.В., Пимоненко Л.И. и др. Днепропетровск: Монолит. 2012. 360 с.
25. Нова фізико-геологічна модель генезису вугільного метану та перспективи її застосування / Булат А.Ф., Безручко К.А., Пимоненко Л.И. и др. / Уголь Украины. 2014. № 4. С. 29-34.
26. Вплив зовнішніх чинників на стан вугільної речовини / Бурчак О.В., Прімін М.А., Недайвода І.В. та ін. / Геотехнічна механіка: Дніпро: ІГТМ НАНУ, 2016. № 124. С. 97–105.
27. Transformation of the energy state of the molecular structure of coal in the process of metamorphism / Bezruchko K.A., Pymonenko L.I., Burchak A.V. et al. / Journal of Geology, Geografy and Geoecology. 2018. №1 (27). P. 30-34. <https://doi.org/10.15421/111827>
28. Звягильский Е. Л., Бобрышев В. В., Бобрышев В. В. Эффект природного антигазового барьера и его роль в формировании газового баланса лавы и особенностей работы поверхностных дегазационных скважин / Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ: ІГТМ НАНУ, 2002. № 37. С. 162–177.
29. Сдвигение массива горных пород и влияние скорости подвигания очистного забоя на выделение метана / Четверик М. С., Андрощук Е. В., Бубнова Е.А. и др. / Сб. науч. трудов НГУ. 2003. №16. С. 42 – 53.
30. Петрук Е. Г. Управление деформационными процессами в динамической мульде сдвигения при подземной разработке пологих угольных пластов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Спец. 05.15.01; Днепропетровск, 1994. 38 с.
31. Усаченко Б. М., Скипочка С. И. Напряженно-деформированное состояние целиков при отработке мощных пологих пластов / Горный журнал. 1988. № 3. С. 50–52.
32. Кучин О. С. Особливості вертикальної деформації масиву гірських порід над розрізною піччю в умовах Західного Донбасу / Вісник ЖДТУ. 2015. № 3 (74). С. 119 – 123.
33. Кольчик Е. И. Сдвигения земной поверхности при больших скоростях отработки угольных пластов / Физико-технические проблемы горного производства. 2009. № 12. С. 47–54.
34. Антощенко Н.И., Филимонов П.Е., Бокий Б.В. Геомеханические и технологические условия газодинамических процессов в угольных шахтах: монография. Алчевск: ДонГТУ, 2013. 291 с.
35. Фейт Г.Н., Малиникова О.Н. Особенности и закономерности геомеханических и физико-химических процессов формирования очагов опасности газодинамических явлений в шахтах / ГИАБ Метан. 2007. №S13. С. 192–205.
36. Артемьев В. Б., Еремин И. В., Лисуренко А. В. Условия образования и характерные признаки динамики активных углей. М.: Недр коммюникейшенс ЛТД, 1999. 496 с.
37. Мюллер Р. Л., Попов В. С. К вопросу о кинетике газовой выделения в связи с проблемой метаморфизма угля / Журнал прикладной химии. 1957. № 2 (30). С. 271.
38. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. М.: Наука, 1964. 568 с.
39. Гюльмалиев А. М., Головин Г. С., Гладун Т. Г. Теоретические основы химии угля. М.: Изд-во МГУ, 2003. 556 с.
40. Саранчук В.И., Айруни А.Т., Ковалев К.Е. Надмолекулярная организация, структура и свойства угля. К.: Наук.думка, 1988. 192 с.
41. Русьянова Н. Д. Углекислота. М.: Наука, 2003. 316 с.
41. Ргель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая теория прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 560 с.
43. Фальбе Ю. Химические вещества из угля. М.: Химия, 1980. 616 с.
44. Дашевский В.Г. Конформационный анализ макромолекул. М.: Наука, 1987. 288 с.

REFERENCES

1. Bulat, A. F., Zviagilskiy, E. L., Lukinov, V. V. et. al. (2008), *Ugleporodnyu massiv Donbassa kak geterogennaya sreda* [Donbass coal massif as a heterogeneous environment], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
2. Baohai Yu., Chengxiang Su., Deming Wang. Study of the features of outburst caused by rock cross-cut coal uncovering and the law of gas dilatation energy release / International Journal of Mining Science and Technology. Vol. 25. Issue 3. May 2015. P. 453–458. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.03.020>
3. Coal and gas outburst dynamic system / Fan Chaojun, Li Sheng, Luo Mingkun and others / Journal of Mining Science and Technology. 2017. Vol. 27 P. 49–55. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2016.11.003>
4. Lu Wei Dong, Ji Ren Wang, Ju Yi Wen. Microscopic Mechanism of Adsorption–Desorption in Coal and Gas Outburst Process / Journal of Nanoscience and Nanotechnology. 2017. Vol. 17, Num. 9. P. 6894–6898. <https://doi.org/10.1166/jnn.2017.14460>
5. The impacts of stress on the chemical structure of coals: a mini-review based on the recent development of mechanochemistry / Quanlin Houa, Yuzhen Hana, Jin Wangb and others / Science Bulletin, Vol. 62, Iss. 13, 2017, P. 965–970. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2017.06.004>

6. Shi, X., Song, D. and Qian, Z. (2017), "Classification of coal seam outburst hazards and evaluation of the importance of influencing factors", *Open Geosciences*, vol. 9, pp. 295-301. <https://doi.org/10.1515/geo-2017-0024>
7. Wang, Ch., Yang, Sh., Yang, D., Li, X., Jiang, Ch. (2018), "Experimental analysis of the intensity and evolution of coal and gas outbursts", *Fuel*, vol. 226, 15 August 2018, pp. 252-262. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.03.165>
8. An, F., Yuana, Yu, Chenacd, X., Lia, Z. and Li, L. (2019), "Expansion energy of coal gas for the initiation of coal and gas outbursts", *Fuel*, vol. 235, 1 January 2019, pp. 551-557. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.07.132>
9. Hou, Ch., Zhang, Y. and Yan, Yi. (2019), "Effects of coal seam dip angle on the outburst in coal roadway excavation", *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 29, issue 5, September 2019, pp. 757-764. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.08.001>
10. Cao, J., Dai, L., Sun, H., Wang, B., Zhao, B., Yang, X. and Zhao, X. (2019), "Experimental study of the impact of gas adsorption on coal and gas outburst dynamic effects", *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 128, August 2019, pp. 158-166. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.05.020>
11. Zykov, V.S. and Abramov, I.L. (2015), "Clarification of the classification of dynamic phenomena in coal mines", *Vestnik*, no. 3, pp. 74-83.
12. Kiryayeva, T.A. (2015), "Variability of the physical and chemical properties of a coal seam as a sign of its increased outburst hazard", *Interespo Geo-Sibir*, vol. 2, no. 2, pp. 8-12.
13. Smirnov, V.G., Dyrdin, V.V., Ismagilov, Z.R. et al. (2017), "On the influence of the forms of the connection of methane with a coal matrix on the gas-dynamic phenomena arising from underground mining of coal seams", *Vestnik*, vol. 1, pp. 34-40. <https://doi.org/10.26631/arc1-2017-34-41>
14. Larin, M.K. (2018), "Analysis of methods and means of forecasting and preventing sudden emissions of coal and gas in coal mines", *Vestnik Sibirskogo industrialnogo un-ta*, no. 3 (25), pp. 54-57.
15. Kolesnichenko, I.E., Artemiev, V.B. and Kolesnichenko, E.A. (2019), "The evolution of methods for studying methane safety in the development of coal seams", *Ugol*, no. 7 pp. 36-41. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2019-7-36-41>
16. Larin, M.K., Rozum, I.G. and Bushuev, K.I. (2019), "Types and causes of gas-dynamic phenomena in coal mines", *Vestnik Sibirskogo industrialnogo un-ta*, no. 4 (30), pp. 25-27.
17. Ganova, S.D., Skopintceva, O.V. and Isaev, O.N. (2017), "On the study of the composition of hydrocarbon gases in coal seams and dust in order to predict their potential hazard", *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo un-ta*, vol. 330, no. 6. pp. 109-115.
18. Dennis, J. Black (2017), "Investigations into the identification and control of outburst risk in Australian underground coal mines", *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 27, pp. 749-753. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.07.006>
19. Dennis, J. Black (2019), "Review of coal and gas outburst in Australian underground coal mines", *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 29, pp. 815-824. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.01.007>
20. Nilufer, K. and Onder, M. (2019), "Application of structural equation modeling to evaluate coal and gas outbursts", *Tunnelling and Underground Space Technology*, June 2019, vol. 88, pp. 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.02.017>
21. Hou, Ch., Zhang, Y. and Yan, Y. (2019), "Effects of coal seam dip angle on the outburst in coal roadway excavation International", *Journal of Mining Science and Technology*, vol. 29, pp. 757-764. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.08.001>
22. Bulat, A.F. and Dyrda, V.I. (2013), "Sudden outbursts of coal and gas in the context of nonlinear nonequilibrium thermodynamics", *Ugol Ukrainy*, no. 12, pp. 24-33.
23. Bulat, A.F. and Dyrda, V.I. (2013), "Some problems of gas-dynamic phenomena in coal massif in the context of nonlinear nonequilibrium thermodynamics", *Geo-Technical Mechanics*, no. 108, pp. 3-31.
24. Bulat, A.F., Lukinov, V.V., Pimonenko, L.I. et. al. *Geologicheskkiye osnovy i metody prognoza vybrosoopasnosti uglya, porod i gaza* [Geological foundations and methods for forecasting the outburst hazard of coal, rocks and gas], Monolit, Dnepropetrovsk, Ukraine.
25. Bulat, A.F., Bezruchko, K.A., Pimonenko, L.I. et. al. "A new physical-geological model of the genesis of coal-methane, methane and prospects for the development", *Ugol Ukrainy*, no. 4, pp. 29-34.2014.
26. Burchak, O.V., Primin, M.A., Nedaivoda, I.V. et. al. "The inflow of new officials to the camp of the great speech", *Geo-Technical Mechanics*, no. 124, pp. 97-105.
27. Bezruchko, K.A., Pymonenko, L.I., Burchak, A.V. et al. (2018), "Transformation of the energy state of the molecular structure of coal in the process of metamorphism", *Journal of Geology, Geografy and Geoecology*, №1 (27), pp. 30-34. <https://doi.org/10.15421/111827>
28. Zviagilskiy, E.L., Bobryshev, V.V. and Bobryshev, V.V. (2002), "The effect of the natural anti-gas barrier and its role in the formation of the gas balance of the lava and the peculiarities of the operation of surface degassing wells", *Geo-Technical Mechanics*, no. 37, pp. 162-177.
29. Chetverik, M. S., Androshchuk, E.V., Bubnova, E.A. et al. (2003). "Displacement of the rock mass and the effect of the rate of movement of the cleaning face on the release of methane", *Sbornik nauchnykh trudov NGU, №16*, pp. 42-53.
30. Petruk, E. G. (1994), "Control of deformation processes in a dynamic shear trough in underground mining of shallow coal seams", Abstract of D. Sc. dissertation, Mine surveying, NGU, Dnepropetrovsk, Ukraine.
31. Usachenko, B.M. and Skipochnka, S.I. (1988), "Stress-strain state of pillars during the development of thick shallow seams", *Gornyy zhurnal*, no. 3, pp. 50-52.
32. Kuchin, O.S. (2015), "Features of vertical deformation of the rock mass over the split furnace in the conditions of the Western Donbass", *Visnyk ZHDTU*, no. 3 (74), pp. 119-123.

33. Kolchik, E. I. (2009), "Displacements of the earth's surface at high rates of mining of coal seams", *Fiziko-tekhnicheskie problemy gornogo proizvodstva*, no. 12, pp. 47–54.
34. Antoshchenko, N.I., Filimonov, P.E. and Boki, B.V. (2013), *Geomekhanicheskie i tekhnologicheskie usloviya gazodinamicheskikh protsessov v ugolnykh shakhtakh* [Geomechanical and technological conditions of gas-dynamic processes in coal mines], DonGTU, Alchevsk, Ukraine.
35. Feyt, G. N. and Malinnikova, O.N. (2007), "Features and patterns of geomechanical and physicochemical processes of formation of centers of danger of gas-dynamic phenomena in mines", *GIAB Metan*, no. S13. pp. 192–205.
36. Artemiev, V.B., Eremin, I.V. and Lisurenko, A.V. (1999), *Usloviya obrazovaniya i kharakternye priznaki dinamiki aktivnykh ugley* [Conditions of formation and characteristic features of the dynamics of active coals], Nedra kommunikeyshchens LTD, Moscow, Russia.
37. Muller, R.L. and Popov, V.S. (1957), "On the kinetics of gas release in connection with the problem of coal metamorphism", *Zhurnal prikladnoy khimii*, no. 2 (30), p. 271.
38. Landau, L. D. and Lifshitz, E. M. (1964), *Statisticheskaya fizika* [Statistical physics], Nauka, Moscow, USSR.
39. Giulmaliev, A. M., Golovin, G. S. and Gladun, T. G. (2003), *Teoreticheskie osnovy khimii uglya* [Theoretical fundamentals of the chemistry of coal], Izd-vo MGGU, Moscow, Russia.
40. Sarahnchuk, V.I., Ayruni, A.T. and Kovalev, K.E. (1988), *Nadmolekulyarnaya organizatsiya, struktura i svoystva uglya* [Supramolecular organization, structure and properties of coal], Naukova dumka, Kiev, USSR.
41. Rusiyanova, N.D. (2003), *Uglekhimiya* [Coal chemistry], Nauka, Moscow, Russia.
42. Regel, V.R., Slutsker, A.I. and Tomashevskiy, E.E. (1974), *Kineticheskaya teoriya prochnosti tverdykh tel* [Kinetic theory of strength of solids], Nauka, Moscow, USSR.
43. Falbe, I.U. (1980), *Khimicheskie veshchestva iz uglya* [Chemicals from coal], Khimiia, Moscow, USSR.
44. Dashevskiy, V.G. (1987), *Konformatsionnyy analiz makromolekul* [Conformational analysis of macromolecules], Nauka, Moscow, USSR.

Про авторів

Безручко Костянтин Андрійович, доктор геологічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу геології вугільних родовищ великих глибин, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, gvrvg@meta.ua.

Бурчак Олександр Васильович, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу геології вугільних родовищ великих глибин, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, gvrvg@meta.ua.

Приходченко Світлана Юрївна, кандидат геологічних наук, старший науковий співробітник, с.н.с. відділу геології вугільних родовищ великих глибин, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, gvrvg@meta.ua.

Слободянникова Валентина Кузьмівна, магістр, провідний інженер відділу геології вугільних родовищ великих глибин, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, gvrvg@meta.ua.

About the authors

Bezruchko Kostiantyn Andriivych, Doctor of Geology Science (D.Sc), Senior Researcher, Head of Department of Geology of Coal Beds at Great Depths, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, gvrvg@meta.ua

Burchak Oleksandr Vasylyovych, Doctor of Technic Science (D.Sc), Senior Researcher, Senior Research in Department of Geology of Coal Beds at Great Depths, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, gvrvg@meta.ua,

Prykhodchenko Svitlana Yuriivna, Candidate of Geology Science (Ph.D), Senior Researcher of Department of Geology of Coal Beds at Great Depths, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, gvrvg@meta.ua

Slobodiannikova Valentyna Kuzmivna, Master of Science, Principal Specialist of Department of Geology of Coal Beds at Great Depths, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, gvrvg@meta.ua

Анотация. Практический опыт разработки газонасыщенного углепородного массива, а также результаты научных исследований указывают на несовершенство существующих представлений относительно процессов в предельнонапряженном углепородном массиве, механизмов возникновения и протекания газодинамических явлений (ГДЯ).

Проведенный анализ состояния проблемы относительно природы и механизма внезапных выбросов угля, пород и газа, в целом засвидетельствовал, что выбросоопасность обусловлена сложным взаимодействием трех главных естественных факторов (напряженного состояния, газового фактора и физико-механических свойств горных пород) с технологическими, а формирование выбросоопасных условий происходит в геологических средах, которые характеризуются определенными свойствами и состоянием.

Целью работы является разработка новых теоретических представлений о природе ГДЯ, с учетом геологических условий и влияния внешних факторов, путем разработки гипотезы относительно физико-химической природы ГДЯ.

Доказано, что разгрузка пласта от напряжений, которые возникли в молекулярной структуре под воздействием геологических факторов приводит к активации релаксационных процессов в веществе. Следствием релаксации системой накопленной энергии являются структурные превращения с выделением низкомолекулярных соединений. По этой схеме происходит формирование газоносности углепородного массива за счет газов генетически связанных с ископаемым органическим веществом и возникновения газодинамических явлений.

Суть гипотезы заключается в том, что частичная разгрузка углепородного массива создает в трещиноватых зонах угольного пласта условия для релаксации упругой энергии, накопленной в молекулярной структуре угля, которая способствует активации структурных превращений по свободно-радикальному механизму, следствием чего является выделение низкомолекулярных соединений (в частности метана). При соответствующих условиях в зоне релаксации упругих деформаций процесс может приобрести лавинообразный характер, то есть инициировать внезапные выбросы угля и газа.

Согласно физико-химической модели метановыделения в каменном угле под воздействием геомеханических, геологических и техногенных факторов, что предлагается в рамках этой работы, частичная разгрузка создает в угольном пласте условия для релаксации упругой энергии накопленной в молекулярной структуре угля. То есть способствует активации структурных преобразований по свободно-радикальному механизму, следствием которых является выделение низкомолекулярных соединений (метана). При условии достаточно высокой трещиноватости зоны упругих деформаций процесс приобретает лавинообразный характер, то есть развиваются внезапные выбросы угля и газа.

Ключевые слова : уголь, угольные шахты, газодинамические явления, выбросы угля и газа, напряжено-деформированное состояние.

Abstract. Practical experience in the development of a gas-saturated coal-rock massif, as well as the results of scientific research, point to the imperfection of the existing ideas regarding the processes in the extremely stressed coal-rock massif, mechanisms of the occurrence and behavior of gas-dynamic phenomena (GDP).

The conducted analysis for the problem state regarding the nature and mechanism of sudden outbursts of coal, rocks and gas, in general, confirm that the outburst hazard was due to the complex interaction of three main natural factors (stress state, gas factor and physical-mechanical properties of rocks) with technological ones, and the formation of outburst hazardous conditions occurs in geological environments that are characterized by certain properties and conditions.

The purpose of the paper is to obtain new theoretical understanding of the GDP nature with taking into account geological conditions and the impact of external factors by developing a hypothesis regarding the physicochemical nature of the GDP.

It is proved that relief of stresses arisen in the molecular structure under the impact of geological factors leads to the activation of relaxation processes in the substance. The relaxation of the accumulated energy system results in structural transformations with the release of low-molecular-weight compounds. According to this pattern, accumulation of gases genetically connected with fossil organic matter and the emergence of gas-dynamic phenomena is formed in the coal-rock massif.

The key point of the hypothesis is that partial stress relief of the coal-rock massif creates in the fractured zones of the coal bed conditions for relaxation of elastic energy accumulated in the molecular structure of coal, hence, promoting the activation of structural transformations by the free-radical mechanism, which results in the release of low-molecular-weight compounds (methane, in particular). Under appropriate conditions, in the zone of relaxation of elastic deformations, the process can assume an avalanche character, namely, initiate sudden outbursts of coal and gas.

According to the physicochemical model of methane release in coal under the impact of geomechanical, geological, and technogenic factors, which is proposed within the framework of this work, partial discharge creates in the coal bed conditions for relaxation of the elastic energy accumulated in the molecular structure of coal. That is, it promotes the activation of structural transformations by the free-radical mechanism, the result of which is the release of low-molecular-weight compounds (methane). Under the condition of sufficiently high fracturing of the elastic deformation zone, the process acquires an avalanche character, that is, sudden outbursts of coal and gas are developed.

Keywords: coal, coal mines, gas-dynamic phenomena, outbursts of coal and gas, stress-strain state.

Стаття надійшла до редакції 16.12.2020