

Володимир БАРАНОВ, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.

e-mail: [andreevich7526@i.ua](mailto:andreevich7526@i.ua)

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна

Яна АНТИПОВИЧ, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.

e-mail: [yana\\_antipovich@ukr.net](mailto:yana_antipovich@ukr.net)

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна

Сергій СТЕФАНКО, мол. наук. співроб.

e-mail: [arkinstone7@gmail.com](mailto:arkinstone7@gmail.com)

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна

### ФРИКЦІЙНІ ЯВИЩА У ВУГІЛЬНИХ ШАХТАХ: ПРИЧИНИ, НАСЛІДКИ ТА ВПЛИВ НА ГАЗОДИНАМІЧНІ ЯВИЩА

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.М. Іванік)

*Вугільні шахти є об'єктами підвищеної небезпеки, оскільки в них відбуваються динамічні, газодинамічні та термічні явища. Ці явища призводять до порушень робочого режиму, виведення з ладу гірничого обладнання, загибелі гірників, збільшення витрат на видобуток вугілля та інших наслідків. Мета статті – викласти результати досліджень умов утворення термічних ефектів у вугільних шахтах та причин їх появи, що має як наукову, так і прикладну актуальність. Проведені дослідження дали зрозуміти, що іскріння може виникати під дією як техногенних, так і природних чинників. Фрикційні явища, що призводять до термодинамічних ефектів, зафіксовані в багатьох шахтах і країнах світу. Основна частина вибухів і спалахів метану відбувається при фрикційному іскрінні порід, що містять сульфід, тому що останні продукують іскри досить високої температури, здатної призводити до займання горючих газів, а також виділення сірководню, що має малу температуру займання. У світовій практиці описано випадки займання горючих матеріалів під час посадки покрівлі за відсутності вугілля. Англійські дослідники зробили висновок, що суміш метан-повітря може спалахувати від іскри, що утворюється під час тертя пісковика об пісковик або аргіліту о пісковик. За літературними даними, займання горючих матеріалів у вугілля може відбуватися: внаслідок викидів та вибухів, ініційованих обваленням порід при посадці; коли іскровий розряд виникає у кварці при трибо- або п'єзоефекті; через присутність піриту у вугіллі або породах; при піроефекті; у разі виникнення електростатичності вугілля. На мікрорівні у кварцових зернах пісковиків встановлено утворення статичних зарядів дислокаціями, які декоруються пилом. Особливо сильний ефект може виникати за наявності в повітрі крім метану монооксиду вуглецю, водню, сірководню та ацетилену. Встановлено збільшення іскріння при фрикційному терті кварцу у присутності вугільного пилу. Наявність газових включень у пісковикі у разі зсувених деформацій призводить до появи додаткових концентрацій вуглеводнів. Унаслідок контакту такої суміші з розігрітою областю виникає короточасний малий спалах, що і є іскрою.*

**Ключові слова:** іскроутворення, вугілля, пісковики, спалах, статичний заряд, порушення порід.

#### **Постановка проблеми та мета дослідження.**

Робота у вугільних шахтах завжди пов'язана із підвищеною небезпекою. Повсюдно, у різних країнах на шахтах відбуваються динамічні, газодинамічні та термічні явища, на ліквідацію наслідків яких витрачаються значні кошти. Мета даної роботи полягає в тому, щоб визначити умови та причини іскроутворення та подальшого самозаймання горючих матеріалів за відсутності прямого техногенного втручання. Актуальними є пошук закономірностей і з'ясування природи іскроутворення для подальшого підвищення безпеки робіт у вугільних шахтах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Виникнення іскор у шахтних умовах гірничих підприємств може відбуватися з різних причин, але всі вони поділяються на дві категорії: природні і техногенні. Техногенна дія на породу при розробці вугільних родовищ часто призводить до різномірних термічних ефектів. Під час роботи прохідницького чи очисного комбайна виникає фрикційне іскріння (Ботвенко 2012). Фрикційні явища, що призводять до термодинамічних ефектів, зафіксовані в багатьох шахтах по всьому світу. Наприклад, лише в одній Німеччині за 20 років з 1965 по 1985 р. сталося 426 вибухів, з яких 111 випадків виникли через фрикційне тертя (Jonsson et al., 1998).

За даними (Забурдяев, 2005), основна частина вибухів метану та загоряння відбувається під час фрикційного іскріння порід, що містять сульфід. Це відбувається тому, що пірит здатний окислюватися і його частинки спалахують у повітрі. За певних умов сульфід і здатні виділяти сірководень та пилоподібну сірку, які

мають малу температуру самозаймання. Зважений у повітрі пил сірки пожежонебезпечний. Нижня концентраційна межа займання – 17 г/м<sup>3</sup>; температура самозаймання – 190° С. Згенерований рідкою сіркою сірководень вибухає при об'ємній концентрації від 4,3 до 45 %; температура самозаймання – 260° С (Анциферов и др., 2004). Іскри, що виникають, здатні ініціювати вибух газоповітряної суміші, що містить достатню концентрацію сірководню, монооксиду вуглецю та метану. У такому разі займання метану відбувається миттєво (Цокельверг, 1931). Крім цього, велике значення має й тиск газу – температура займання метану знижується пропорційно до збільшення тиску.

**Епізодичні зрушення в породах.** У світовій практиці було описано випадки займання горючих матеріалів під час посадки покрівлі за відсутності вугілля. Найпершим документально зафіксованим випадком є вибух, що стався 8 листопада 1896 р в Англії на руднику "Маїнді Піт". Після цього подібні випадки реєструвалися і на інших шахтах. У зв'язку із цим у 1913 р англійці Стірлінг і Кадман провели експерименти зі зразками пісковика, доставленими з копальні "Беллеву", у якому раніше було зафіксовано подібний випадок займання. У кожному експерименті під час тертя породи об породу вдавалося доводити спалах суміші метану з повітрям різної концентрації. За отриманими даними було зроблено висновок, що суміш метан-повітря може спалахувати від іскри, що утворюється під час тертя пісковика об пісковик або аргіліту об пісковик (Цокельверг, 1931).

Окрім цього, відомі випадки винятково геологічного (природного) впливу на виникнення пожеж. Особливий тип рухів, що залежить від властивостей осадових гірських порід, був раніше виділений А. Кізлінгером і названий метатектонічним порушенням (Николаев, 1988). Порушення проявляються в поверхневих переміщеннях окремих блоків корінних порід, зумовлених зануреннями і підняттями, що відбуваються в даний час. Внаслідок цього з'являються відкриті тріщини, геологічні порушення, кліваж. Деформації відбуваються зі швидкістю 1–2 мм на рік і можуть провокувати обвалення порід у гірничі виробки, що призводять до спалахів.

На сьогодні відомі та описані причини періодичних тектонічних деформацій в осадових відкладах Донбасу. Тому загорання горючих матеріалів та вугілля може відбуватися: внаслідок викидів і вибухів, ініційованих обваленням порід при посадці; коли іскровий розряд виникає у кварці при трибо-або п'єзоефекті; через присутність піриту у вугіллі або породах; при піроефекті; у разі виникнення електрестатичних зарядів вугілля (Баранов, 2000; Булат и др., 1989).

**Електричні явища у породах.** Окрім метатектонічних порушень, виділених на макорівні, існують і мікропорушення у мінералах, описані у 50–60-х рр. минулого століття А. Коттрелом (1969), Н. Л. Картером та ін. (1964). Мається на увазі дислокаційна теорія трансформації міцності речовини, розроблена вченими після винаходу В. К. Зворикіним електронного мікроскопа на початку 40-х рр. минулого століття.

У 80-х рр. минулого століття (Баранов, 2000) за допомогою електронного мікроскопа типу ЕОМ-100Л, що просвічує, були досліджені свіжі сколи кварцу з пісковиків вугільної шахти. Там були встановлені системи площин ковзання, з якими пов'язане утворення статичної електрики. На рис. 1 представлено фотографію сколу кварцового зерна із пластичними деформаціями, до яких "прилипили" частинки пилу. Представлені смуги ковзання сформувалися у процесі тектонічних деформацій і є, власне, мікроссувами. Утворення статичних зарядів зазначеними деформаціями декорується пилом, який прилягає саме до зон концентрації таких зарядів.

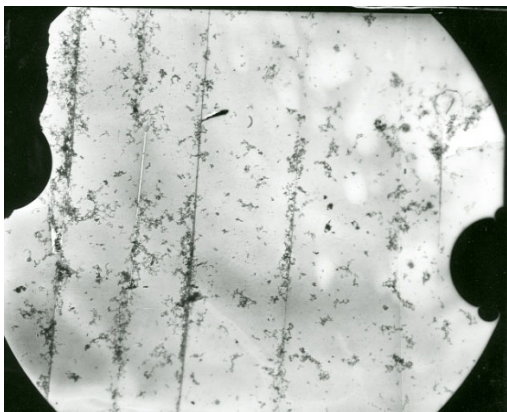


Рис. 1. Смуги ковзання в зерні кварцу з пісковика вугільної шахти, що декоруються пилом (Баранов, 2000)

Загалом електричні явища у породах відомі давно й описані в Гірській енциклопедії (Горная энциклопедия, 1989). До таких належать п'єзоелектричні властивості гірських порід (п'єзотиски) – здатність кристалічних речовин створювати електричну поляризацію під час стискання або розтягування їх у певних напрямках. Залежно від властивостей мінералів і порід можуть накопичуватися як позитивні, так і негативні заряди. Останні можуть

реалізовуватися у вигляді електричних розрядів. Прикладом є трибоелектрика, властиве деяким породам і мінералам – явище виникнення електричних зарядів під час тертя. Крім того, у гірських породах можуть існувати такі явища, як електроліз, піроелектрика тощо, які можуть призводити до накопичення достатніх електростатичних зарядів і подальшого виникнення електричних розрядів у вигляді іскріння.

Велику роль у появі термічних ефектів може відігравати статична електризація. За даними (Забурдяев, 2005), це явище може бути причиною вибухів або спалахів газових сумішей, що містяться в привибійній частині. Автор (Леб, 1963) зазначає, що статична електризація охоплює всі процеси, що ведуть до утворення та поділу позитивних і негативних електричних зарядів у результаті механічної деформації (у даному випадку внаслідок диспергування води та руйнування вугільного масиву). У разі диспергування твердих частинок вугілля або рідин суміші таких заряджених частинок з повітрям зазвичай вибухонебезпечні. Електричний заряд унаслідок механічної деформації легше виникає у присутності крапель води, ніж у присутності вугільного пилу.

**Експериментальні дослідження. Відбір проб.** Для детального дослідження іскроутворення в гірських породах на кількох шахтах Донбасу було відібрано різні зразки порід (пісковики, вапняк, аргіліт, тонштейн). Зразки мали різні форми: кілька пісковиків відібрано з керна пробурених підземних свердловин; аргілітовий kern з іншої шахти, розділений по площині нашарування на пластини до декількох десятків міліметрів завтовшки; решта мали форму штуфів. Kern пісковика з підземних свердловин був відібраний у шахті, де зафіксовано випадок самозаймання горючих матеріалів на відпрацьованій ділянці. З отриманих проб виготовлено шліфи, проведено комплекс експериментів, результати яких викладено нижче. Частина результатів раніше була опублікована в роботі (Баранов и др., 2019). Проте з'явилися нові дані, отримані завдяки проведенню додаткових експериментів, які представлені в цій статті.

**Експеримент із генерації електрики.** Першу серію лабораторних досліджень було проведено у спробі отримати як якісні, так і кількісні характеристики величини статичної електрики з наявних проб пісковика. Мета експерименту полягала в тому, щоб визначити можливість виникнення та величини статичного заряду в породах. Об'єктом дослідження були диски пісковика різної структури, вирізані з керна. Диски зазнавали зовнішніх динамічних впливів, що призвело до виникнення у структурі зсувних деформацій. Завдяки застосуванню спеціальних чутливих геологічних методів поблизу поверхні зразків було зафіксовано наявність слабого статичного заряду. Однак даним методом неможливо визначити величину заряду в цифровому вираженні, лише наявність або відсутність статичного заряду.

У процесі проведення експерименту для досягнення кількісних результатів була спроба використовувати цифровий вимірювальний прилад (CM80DIGITAL CLAMP METER), завдяки якому можна фіксувати електромагнітні хвилі, визначати потужність, силу струму, величину напруги, у тому числі статичної електрики. Однак у цьому разі його чутливість була недостатньо високою, щоб виконати кількісні виміри. Отже, для визначення величини статистичного заряду в гірських породах потрібні досить точні дослідження із застосуванням чутливих приладів.

**Експерименти з фрикційного іскріння.** Наступна серія експериментів спрямована на отримання іскор

унаслідок фрикційного тертя. Об'єктом послужили кілька зразків чотирьох типів гірських порід вугільних родовищ. Між зразками створювалося тертя як із нанесенням вугільного пилу на поверхню, так і без нього. Вугільний пил дає змогу відтворити фрикційні процеси, більш

наближені до шахтних умов. Також було виконано петрографічні дослідження деяких пісковиків для з'ясування особливостей мінералогічного складу. Результати фрикційного тертя представлено в табл. 1.

Таблиця 1

## Результати дослідження іскріння внаслідок зсувних деформацій пісковиків

| Найменування зразків                                                            | Іскріння    | Інтенсивність іскріння |
|---------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------------------|
| Пісковик дрібнозернистий ( $d_c = 0,13-0,18$ мм)<br>ш. Покровська $d_4Sd_5$     | Присутня    | Дуже слабка            |
| Пісковик дрібнозернистий покритий вугільним пилом<br>ш. Покровська $d_4Sd_5$    | Присутня    | Слабка                 |
| Пісковик дрібнозернистий ш. Котляревська $l_1Sl_2$                              | Не виявлено | –                      |
| Пісковик дрібнозернистий, покритий вугільним пилом<br>ш. Котляревська $l_1Sl_2$ | Не виявлено | –                      |
| Пісковик крупнозернистий ш. Покровська $d_4Sd_5$                                | Присутня    | Вища за середню        |
| Пісковик крупнозернистий, покритий вугільним пилом<br>ш. Покровська $d_4Sd_5$   | Присутня    | Сильна                 |
| Тонштейн                                                                        | Не виявлено | –                      |
| Тонштейн, покритий вугільним пилом                                              | Не виявлено | –                      |
| Вапняк ш. Центральна $l_6Ll_7$                                                  | Не виявлено | –                      |
| Вапняк, покритий вугільним пилом ш. Центральна $l_6Ll_7$                        | Не виявлено | –                      |
| Аргіліт                                                                         | Не виявлено | –                      |
| Аргіліт, покритий вугільним пилом                                               | Не виявлено | –                      |

Дослідження показали, що внаслідок зсувних деформацій деякі пісковики здатні генерувати іскри. Цей ефект вдалося відобразити на рис. 2. Знімок зроблено у темряві, для кращої демонстрації ефекту іскріння. Неважко припустити, що підвищення площі фрикційної поверхні неминуче збільшуватиме потужність іскріння. За попередніми розрахунками потужність такого іскріння в реальних умовах, у площині середнього порушення умов шахти, буде на кілька порядків сильнішою. Також за результатами простежується закономірність – інтенсивність іскроутворення залежить від крупності уламкових зерен. Експерименти із застосуванням вугільного пилу дозволили зробити такий висновок: вугільний пил може бути каталізатором частоти появи та інтенсивності іскріння, але лише для порід, яким і без того властиве іскроутворення.



Рис. 2. Іскріння кварцових пісковикових штурфів у процесі зсувної деформації

Під час петрографічного дослідження було відзначено наявність прошарків у пісковиках із суттєвим вмістом уламкового кварцу  $>70\%$ . Разом з уламками порід, польовими шпатами обсяг жорсткого скелета таких прошарків сягає  $90\%$ . У результаті зіставлення отриманих експериментів із даними петрографічного аналізу встановлено, що виникнення іскор залежить від вмісту кварцу досліджуваних порід. Чим більше у складі і більші за розміром кварцові зерна у породі, тим жорсткіший скелет і сильніше виявляється даний ефект. Зменшення вмісту кварцу в породі та зменшення розмірів уламкових зерен і збільшення вмісту цементу пісковиків призводить до

зменшення інтенсивності іскріння. Прошарки крупнозернистого кварцового пісковика можуть займати незначні обсяги за мірками шахти та провокувати явища іскріння, а отже, й інші негативні процеси у відпрацьованих гірничих виробках.

**Інтерпретація отриманих результатів.** Як раніше згадувалося – у шахтних умовах іскри можуть виникати в умовах сильного тертя деяких включень, зокрема піриту. Але як показав петрографічний аналіз, у структурі досліджуваного пісковика даних включень піриту не виявлено. Однак деякі зразки мають сильний ефект іскріння. Причини можуть бути різні: особливість мікрровключень або люмінесценція кварцу. Проте одним з пояснень цього може бути раніше досліджена закрита зернова пористість пісковиків (Баранов, 2000).

Закрита пористість пісковиків здебільшого практично не розглядається, оскільки вважається, що цей параметр порід не становить вагомого інтересу з погляду видобутку газу або вирішення проблем викидонебезпеки. Однак щодо проблем термічних і газодинамічних явищ на шахтах слід приділяти особливу увагу дослідженню цього фактору.

Загальновідомий спосіб визначення закритої пористості розрахунковим методом, як різниці між загальною і відкритою пористістю, дає змогу отримати значення переважно того обсягу закритих пор, який міститься в цементі породи. Наприклад, для пісковиків Донбасу цей показник зазвичай не перевищує  $1-3\%$  (Забигайло і др., 1983). Дослідження газонесних пісковиків Донецького басейну на мікрорівні за допомогою оптичного мікроскопа дозволило умовно виділити окремий тип закритої пористості – зерновий. Такий тип раніше ніколи не враховували. Відомо, що закриту зернову пористість створюють різні типи газових включень у кварцових зернах пісковиків. Вони представлені у вигляді закритих мікропор та тріщин під тиском до  $50$  МПа (Baranov and Antipovich, 2018). Газ у включеннях перебуває під великим тиском в ізольованих порах або у вигляді смужок Бьоме, подальша трансформація яких утворює так звану губчасту структуру (Баранов, 2000). За складом газові включення представлені переважно метаном, з

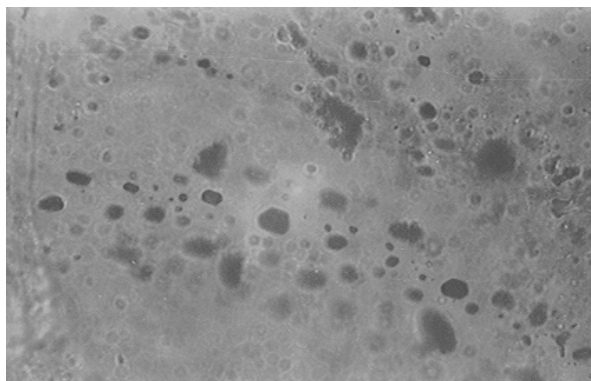


домішками вуглекислого газу, азоту, ацетилену та інших (Баранов, 2000; Наумов и Наумов, 1980).

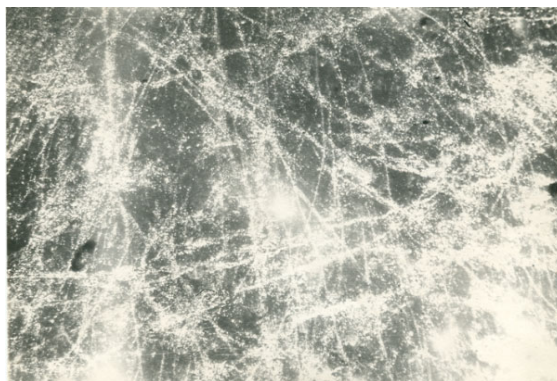
Пісковик як основний колектор накопичує газ у відкритих порах, але у разі підвищення тиску на породу частина газу мігрує в мікрODEФОРМАЦІЇ кварцових зерен, що формуються за певних напруг, які після заліковування утворюють зернову закриту пористість. Можливий зворотний процес, коли під час тектонічного розвантаження частина газу мігруватиме з мікрODEФОРМАЦІЙ уламкових зерен порід у міжзерновий простір породи. Враховуючи, що обсяг газових включень у кварці може

сягати 4–10 см<sup>3</sup> на 100 г кварцу (Якшин, 1975) та додатковий тиск гірського масиву, у якому розташований пісковик, газові включення можуть становити додатковий імпульс газодинамічних проявів (рис. 3).

Обсяги закритої пористості, які можна отримати за допомогою запропонованої методики, є абсолютними. Дослідження під оптичним мікроскопом зі збільшенням 1200 крат з імерсією дають змогу побачити включення з мінімальним розміром 0,1 мкм. Якщо проводити дослідження під ще більшим збільшенням, на нашу думку, можливо встановити і менший розмір включень.



зб. 1200<sup>x</sup> з імерсією



зб. 100<sup>x</sup>

Рис. 3. Газові включення в зернах кварцу пісковиків Донбасу (Баранов, 2000; Баранов и др., 2019)

Присутність газових включень у зернах пісковика під час зсувних деформацій призводить до появи внутрішньої напруги в мінералі, що провокує природну декрепітацію газових включень (Реддер, 1987). Більше того, тертя руйнує частину мінералів у площі зіткнення. Усе це разом призводить до вивільнення газових включень. Такий процес різко збільшує концентрацію метану на ділянці зіткнення. У результаті контакту такої суміші з розігрітою областю виникає короточасний малий спалах, що і є іскрою. Підтвердженням цього є й залежність між інтенсивністю іскріння та кількістю вмісту кварцу, адже у пісковиках більшою мірою кварц є основним носієм описаних газових включень.

#### Висновки

На сьогодні відомо, що причинами виникнення іскріння під час відпрацювання вугільних пластів можуть бути різні фактори, головним з яких є удар або тертя гірських порід, або фрикційне тертя металу о жорстку структуру породи. Без прямого техногенного втручання вагомими факторами стають такі, як: різкі зрушення пісковика під час посадки покрівлі, що призводять до їх тертя, або статична електрика, накопичена у кварці. Проведені експерименти показали, що такі явища у гірських породах за певних умов можуть виникати. Особливо небезпечні вони в шахтних умовах – де часто присутній осілий або у вигляді суспензії в повітрі вугільний пил, комплекс різних горючих газів, як у шахтній атмосфері, так і у структурі пісковика, плюс гірський тиск. Як горючі гази можуть виступати сірководень, ацетилен і метан. Перші два мають досить низьку температуру загорання, тому іскри, що з'явилися, здатні ініціювати загорання вуглеводнів, залишків вугілля, деревного опорного матеріалу та інших паливно-мастильних матеріалів у гірничих виробках. Якщо цей процес реалізується протягом десятків годин, відрізати його від самозаймання складно. Такі явища можуть виявлятися у вугільних шахтах та й інших гірничих підприємствах.

#### Список використаних джерел

- Анциферов, А.В., Тиркель, М.Г., Хохлов, М.Т. и др. (2004). Газоносность угольных месторождений Донбасса. Научная думка.
- Баранов, В.А., Стефанко, С.В., Головкин, А.М. (2019). Термические эффекты в угольных шахтах. *Сборник научных трудов*. ИГН НАНУ, 93–97.
- Баранов, В.А. (2000). Структурні перетворення пісковиків Донбасу і прогноз їх викидонебезпечності. *Автореф. дис. ... д-ра геол. наук: 04.00.16*. Дніпропетровськ.
- Ботвенко, Д.В. (2012). Проблема фрикционного воспламенения метановоздушной смеси в современных условиях. *Научно-технический журнал "Вестник"*, 2, 48–50.
- Булат, А.Ф., Яценко, И.А., Баранов, В.А. (2017). Влияние условий формирования угольных месторождений и горно-геологических условий на безопасность работ в шахтах. *Уголь Украины*, 11–12, 30–38.
- Горная энциклопедия. (1989). Т. 4. Советская энциклопедия.
- Забигайло, В.Е., Лукинов, В.В., Широков, А.З. (1983). Выбросоопасность горных пород Донбасса. Киев: Научная думка.
- Забурдяев, Г.С. (2005). Фрикционное искрение как источник воспламенения метана и способы его предотвращения. *Сборник научных трудов*. Наука, 206–213.
- Леб, Л. (1963). Статическая электризация. Государственное энергетическое издательство.
- Наумов, Г.Б., Наумов, В.Б. (1980). Включения в минералах как источник информации в изучении геологических процессов. *Сборник научных трудов*. Наука, 178–195.
- Николаев, Н.И. (1988). Новейшая тектоника и геодинамика литосферы. Недра.
- Реддер, Э. (1987). Флюидные включения в минералах. Т. 1. Природа включений и методы их исследований. Мир.
- Цокельверг, Н.Г. (1931). Результаты опытных исследований за границей в области изучения воспламенения гремучего газа от трения. *Уголь*, 71–72.
- Якшин, В.И. (1975). Гранулированный кварц – новый вид минерального сырья. *Автореф. дис. ... д-ра геол.-минералог. наук: 04.00.15*. Свердловск.
- Baranov, V.A., Antipovich, Ya.V. (2018). The results of the research of sandstones closed porosity. *Journal of Geology*, 27(3), 414–421.
- Jonsson, L., Lohdi, J., Rentsch-Jonas, M., Simonsson, B. (1998). In: International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosion. Eighth International Colloquium on Dust Explosions. Illinois, 171–174.

#### References

- Antsiferov, A.V., Tirkel, M.G., Khokhlov, M.T. et al. (2004). Gas content of Donbas coal deposits. *Naukova dumka* [In Russian].
- Baranov, V.A. (2000). Structural transformations of Donbas sandstones and the forecast of their release hazard. *Extended abstract of Doctor's thesis (Geol.): 04.00.16*. Dnipropetrovsk [In Ukraine].
- Baranov, V.A., Antipovich, Ya.V. (2018). The results of the research of sandstones closed porosity. *Journal of Geology*, 27(3), 414–421 [In Russian].

Baranov, V.A., Stefanko, S.V., Golovko, A.M. (2019). Thermal effects in coal mines. *Collection of scientific papers*. IGN NASU, 93–97 [In Russian].

Botvenko, D.V. (2012). The problem of frictional ignition of methane-air mixture in modern conditions. *Scientific and technical journal "Bulletin"*, 2, 48–50 [In Russian].

Bulat, A.F., Yashchenko, I.A., Baranov, V.A. (2017). Influence of the formation conditions of coal deposits and mining and geological conditions on the safety of work in mines. *Coal of Ukraine*, 11–12, 30–38 [In Russian].

Jonsson, L., Lohdi, J., Rentsch-Jonas, M., Simonsson, B. (1998). In: International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosion. Eighth International Colloquium on Dust Explosions. Illinois, 171–174.

Loeb, L. (1963). Static electrification. State Energy Publishing House [In Russian].

Mountain Encyclopedia. (1989). V. 4. Soviet encyclopedia [In Russian].

Naumov, G.B., Naumov, V.B. (1980). Inclusions in minerals as a source of information in the study of geological processes. *Collection of scientific papers*. Nauka, 178–195 [In Russian].

Nikolaev, N.I. (1988). Recent tectonics and geodynamics of the lithosphere. Nedra [In Russian].

Roedder, E. (1987). Fluid inclusions in minerals. V.1. Nature of inclusions and methods of their research. Mir [In Russian].

Tsokelverg, N.G. (1931). The results of experimental research abroad in the field of ignition of explosive gas from friction. *Coal*, 71–72 [In Russian].

Yakshin, V.I. (1975). Granulated quartz is a new type of mineral raw material. *Extended abstract of Doctor's thesis (Geol.-Min.)*: 04.00.15. Sverdlovsk [In Russian].

Zabigailo, V.E., Lukinov, V.V., Shirokov, A.Z. (1983). Outburst hazard of Donbass rocks. Naukova dumka [In Russian].

Zaburdyayev, G.S. (2005). Frictional sparking as a source of ignition of methane and ways to prevent it. *Collection of scientific papers*. Nauka, 206–213 [In Russian].

Отримано редакцією журналу / Received: 24.03.23  
Прорецензовано / Revised: 16.05.23  
Схвалено до друку / Accepted: 31.08.23

Volodimir BARANOV, DSc (Geol.), Senior Researcher

e-mail: andreevich7526@i.ua

Institute of Geotechnical Mechanics named after M. S. Polyakov under the NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine

Yana ANTIPOVICH, PhD (Geol.), Senior Researcher

e-mail: yana\_antipovich@ukr.net

Institute of Geotechnical Mechanics named after M. S. Polyakov under the NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine

Serhii STEFANKO, Junior Researcher

e-mail: arkinstone7@gmail.com

Institute of Geotechnical Mechanics named after M. S. Polyakov under the NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine

### FRICTIONAL PHENOMENA IN COAL MINES: REASONS, CONSEQUENCES AND INFLUENCE ON GAS DYNAMIC AND THERMAL PHENOMENA

Coal mines are objects of increased danger, since dynamic, gas-dynamic and thermal phenomena occur in them. These phenomena lead to violations of the operating regime, the failure of mining equipment, the death of miners, an increase in the cost of coal mining and other consequences. The purpose of the article is to present the results of studies of the conditions for the formation of thermal effects in coal mines and the reasons for their occurrence, which has both scientific and applied relevance. The conducted studies made it clear that sparking can occur under the influence of both man-made and natural factors. Friction phenomena leading to thermodynamic effects have been recorded in many mines and countries of the world. The main part of explosions and fires of methane occurs during frictional sparking of rocks containing sulfides. The latter produce sparks of a sufficiently high temperature, which can lead to the ignition of combustible gases, as well as the release of hydrogen sulfide, which has a low ignition temperature. In world practice, cases of ignition of combustible materials during the landing of the roof in the absence of coal have been described. British researchers concluded that the methane-air mixture can be ignited by a spark generated by the friction of sandstone against sandstone or mudstone against sandstone. According to the literature data, the ignition of combustible materials and coals can occur as a result of: emissions and explosions, rock collapse during landing, when a spark discharge occurs in quartz during a tribo- or piezoelectric effect; the presence of sulfides in coals or rocks, pyroelectric effect; electrification of coals. At the micro level, in quartz grains of sandstones, the formation of static charges by dislocations, which are decorated with dust, has been established. A particularly strong effect can occur if, in addition to methane, carbon monoxide, hydrogen, hydrogen sulfide, and acetylene are present in the air. An increase in sparking during frictional friction of quartz in the presence of coal dust has been established. The presence of gas inclusions in sandstone minerals during shear deformations leads to the appearance of additional concentrations of hydrocarbons. As a result of contact of such a mixture with a heated area, a short-term small flash occurs, which is a spark.

**Key words:** sparking, coals, sandstones, fire, static charge, rock disturbances.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.