

МЕХАНІЗМ ФОРМУВАННЯ СЛІДІВ ГАЗОГЕНЕРАЦІЇ У КАМ'ЯНОМУ ВУГІЛЛІ**¹Барановський В.І., ²Савицький В.В., ¹Бурчак О.В.**¹Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, ²Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України**МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ СЛЕДОВ ГАЗОГЕНЕРАЦИИ В КАМЕННЫХ УГЛЯХ****¹Барановский В.И., ²Савицкий В.В., ¹Бурчак А.В.**¹Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, ²Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины**MECHANISM OF GAS-GENERATION TRACK FORMATION IN COAL****¹Baranovskyi V.I., ²Savitskyi V.V., ¹Burchak O.V.**¹ Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine, ² Ye.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine

Анотація. Стаття присвячена питанням походження структурних трансформацій, що проходять у твердій складовій викопної органіки під зовнішнім тепловим впливом, внаслідок яких відбувається виділення летких низькомолекулярних з'єднань. У роботі наведено результати експериментальних досліджень газогенераційних процесів у кам'яному вугіллі методами електронної широкографії та вугільної петрографії. Методами вугільної петрографії, на зразках вугілля усіх стадій метаморфізму, зафіксовано мікродефекти будови вугільного пласта у вигляді газових «бульбашок» з каналом відведення утворених газів. Представлено можливий механізм утворення мікродефектів вугільного пласта. Зроблений висновок ґрунтується на результатах експериментальних досліджень внутрішніх дефектів в речовині неруйнівними методами контролю за оригінальними методиками Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона. Методами електронної широкографії, експериментально доведено, що під впливом слабких теплових потоків у вугіллі виникають структурні напруження пов'язані з неоднорідністю та дефектністю будови речовини. Релаксація енергії цих напружень, у молекулярній структурі вугілля, в умовах гірського масиву, відбувається за рахунок перетворень вільно-радикального характеру, які супроводжуються виділенням флюїдів. На мікрорівні наслідком перетворень є формування газових «бульбашок» і тріщино-пористої структури вугілля. Структурні трансформації в органічній складовій вугілля проходять у повній відповідності до фізико-хімічної моделі перетворень з виділенням газоподібних вуглеводнів. Комплексне використання двох незалежних методів дослідження дозволило встановити природу дефектів структури вугілля і визначити механізм формування та розвитку газових «бульбашок», як слідів генерації твердою вугільною речовиною летких низькомолекулярних з'єднань. В умовах постійного теплового потоку з надр Землі процеси газогенерації у вуглепородному масиві мають перманентний характер, але відбуваються з різною швидкістю.

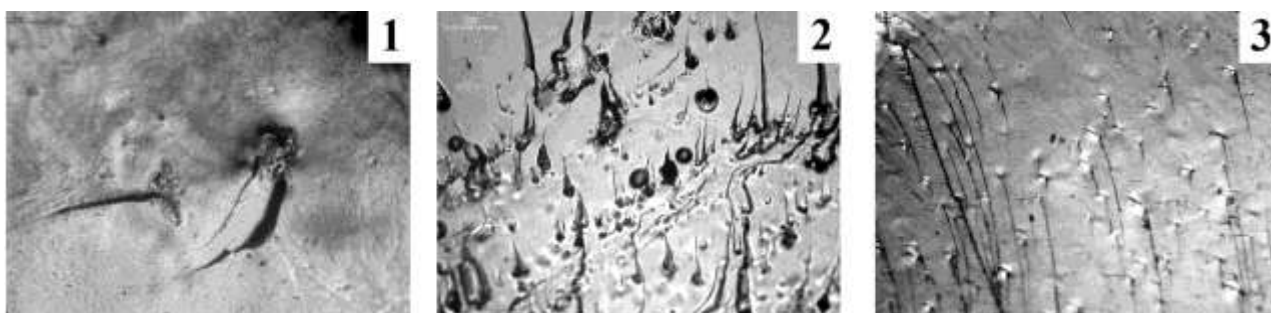
Ключові слова: кам'яне вугілля, структурні трансформації, газогенерація, електронна широкографія, вугільна петрографія.

Вступ. Практичний досвід розробки газонасичених вугільних пластів і результати наукових досліджень вказують на недосконалість існуючих уявлень щодо перетворень, які відбуваються у кам'яному вугіллі під впливом геомеханічних, техногенних та інших факторів. Залишаються експериментально не доведеними процеси генерації летких низькомолекулярних з'єднань твердою вугільною речовиною. Зокрема не з'ясовані джерела енергії за рахунок якої відбуваються перетворення, наслідком яких є виділення флюїдів. Тому дослідження механізмів перетворень вугільної речовини, умов виникнення та розвитку структурних трансформацій, що проходять у вугіллі на різних рівнях, в тому числі і на мікрорівні, за якими відбувається емісія твердим вугіллям газоподібних вуглеводнів, є важливими і актуальними.

Метою роботи є енергетичне обґрунтування формування слідів газогенерації у твердій органічній речовині та визначення умов і механізмів активації структурних перетворень на молекулярному рівні у кам'яному вугіллі.

Методи дослідження. Вугілля продукт біохімічного та фізико-хімічного перетворення рослинного матеріалу переважна частина якого пройшла стадію геліфікації. Для аморфної, полікомпонентної, гетерогенної вугільної речовини відсутнє чітке визначення структури. На молекулярному рівні вугілля - макромолекулярна метастабільна вуглефікована органічна речовина з низьким бар'єром активації структурних перетворень. Під впливом зовнішніх чинників, в першу чергу тиску та температури, в результаті фізико-хімічних перетворень, з твердої складової вугілля утворюються легкі низькомолекулярні з'єднання. Проведені дослідження показали, що з твердої викопної органічної речовини, в процесі катагенетичних перетворень, виділяється величезні обсяги флюїдів, в першу чергу метану [1]. Так при перетворенні бурого вугілля у довгополум'яне виділяється 30-40 м³ метану на тонну вугілля. При переході останнього у жирне - 70-80 м³/т, у пісне - 120-150 м³/т, а у слабометаморфізовані антрацити - до 200м³/т. Наслідки структурних трансформацій на молекулярному рівні впевнено простежуються на мікрорівні.

Методами петрографії (оптична мікроскопія) на поверхні необроблених сколів зразків кам'яного вугілля спостерігаються невеличкі дефекти (зародки газових «бульбашок») у застиглій геліфікованій речовині розміром від 1мкм (рис.1). Подібні зародки газових «бульбашок» зафіксовані у донецькому вугіллі усього вуглефікаційного ряду. Сколи на всіх зразках зроблено по потужності пласта (за часом накопичення відкладень). На рис.1.2 простежується шаруватість будови зразка.



1 - марка «Г» шахта «Межирічанська», 2 - марка «Ж» шахта ім. О.Ф. Засядька,
3 - марка «А» шахта «Зоря»

Рисунок 1 - Сліди газогенерації на сколах вугільних зразків різного ступеня вуглефікації

Подібні дефекти є наслідками газогенераційного процесу в твердій вуглефікованій речовині, газовими вкрапленнями з відповідними каналами [2]. Сліди газогенерації виявлені в вугіллі всіх марок від довгополум'яних до антрацитів. Газові «бульбашки» містять не тільки газ, а й газово-рідку субстанцію - флюїд, а також тверду мінеральну складову. Природа «бульбашок» до кінця не встановлена, умови і механізми їх формування та розвитку також.

Пояснити походження «газових бульбашок» можна з точки зору кінетичної теорії академіка Я.І. Френкеля (1975). На його думку, в основі народження газової «бульбашки» у твердій речовині лежить чечевицеподібна порожнина, що утворюється в результаті миттєвої дії сил розтягування. Сили розтягування в вугільній речовині, в основному, обумовлені дегідратацією вугілля в процесі вуглефікації. Оскільки у сфери найкраще співвідношення між об'ємом і поверхнею, в порівнянні з іншими геометричними формами, то чечевицеподібна порожнина, згодом, набуває сферичної форми. Наслідком цього процесу є також формування ендегенної системи тріщин у вугільному пласті.

Але ця теорія не пояснює механізмів перетворень в молекулярній структурі твердої органічної речовини, що ведуть до виділення газів і утворення газових «бульбашок» на мікрорівні. Зокрема не обґрунтованим залишається енергетичне забезпечення фізико-хімічних перетворень у вугільній речовині, з виділенням летких низькомолекулярних з'єднань, в тому числі вуглеводневих.

У «бульбашок», що утворюються в природних умовах у вугільних пластах, як правило, присутній газівідвідний канал (рис. 2).

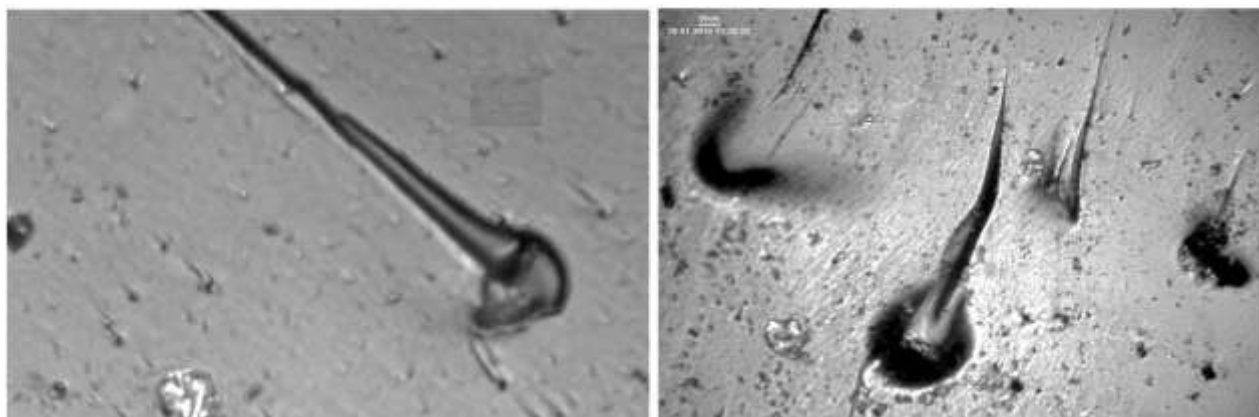


Рисунок 2 - «Газові бульбашки» і конусоподібна форма каналів газівідведення

Проведені масові спостереження на зразках вугілля усіх марок метаморфізму показали, що найчастіше форма газівідвідних каналів «бульбашок» нагадує конус, розвернутий до найближчої тріщини [2, 3]. За допомогою цих каналів газ переміщується у вугіллі, прагнучи досягти елементів тріщино-пористої структури, де він може або зберігатися, або мігрувати до денної поверхні. Кам'яне вугілля є сополімером, тобто його молекулярна структура складається з різних мономерів, але за принципами полімерів. Відповідно сополімер це аморфна речовина з розвинутими реологічними властивостями. Тому тріщини і «бульбашки», після виходу з них частини газів і зниження тиску, можуть закриватися, зникати. Процес газогенерації та дегазації не переривається і після підняття вугілля на поверхню. Але сліди газогенерації у зразках видобутого вугілля практично не мають газівідвідних каналів. Практична відсутність газівідвідних каналів пояснюється полегшеним відводом флюїдів, що утворюються на вільній

поверхні вугілля. Сліди газогенерації зафіксовані науковцями не тільки у кам'яному вугіллі, але також і у вуглистих аргілітах Львівсько-Волинського вугільного басейну [4].

Для дослідження особливостей будови вугілля на мікрорівні та впливу на енергетичний стан вугільної речовини теплового потоку було використано метод електронної ширографії, який дозволяє визначати внутрішні мікродефекти без порушення цілісності зразка та реєструвати деформацію поверхні зразка. Експериментальні дослідження методом електронної ширографії проведені в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.

Суть методу ширографії полягає у наступному [5]. Поверхня об'єкта дослідження частково або повністю освітлюється когерентним лазерним променем. Розсіяне дифузною поверхнею об'єкта світло проходить крізь зсувний елемент і фокусується у площині зображення камери. На матриці камери формується пара поперечно зсунутих зображень об'єкта. Ці два зображення інтерферують одне з одним, створюючи спекл-картину. Порівняння двох спекл-картин, які були записані до та після нагріву (1-2°C) зразка вугілля, дає можливість отримати інтерференційні картини обумовлені тепловим потоком. Застосування методу фазових зсувів дозволяє обчислити фазу $\varphi(x,y)$ в кожній точці (x,y) інтерференційної картини. Така фазова картина (наприклад, рис.3б) відповідає деформації dw/dx поверхні внаслідок нагріву досліджуваного об'єкта [5].

$$dw(x,y)/dx = k \varphi(x,y),$$

де w - переміщення з площини, x - напрямок зсуву зображень в ширографічному інтерферометрі, k - коефіцієнт, що залежить від конфігурації оптичної схеми інтерферометра, $\varphi(x,y)$ - фази інтерференційної смуги.

Аномалії викликані тепловим потоком (термічні напруження) виявляються внаслідок локальної зміни деформування поверхні і характеризують присутність дефектів на контрольованій ділянці та по границях шарів вугільної речовини. На фазових картинах порушення суцільності зразка виділяється великим градієнтом кольору. Причому, чим потужніше ефект, тим ближче до поверхні знаходиться виявлений дефект.

Результати експериментальних досліджень. Фізико-хімічні структурні перетворення, що призводять до виділення флюїдів вугіллям потребують енергії. Для енергетичного обґрунтування формування газових «бульбашок» у твердій речовині та визначення умов і механізмів активації газогенераційних процесів у кам'яному вугіллі методами електронної ширографії були проведені експериментальні дослідження дефектності вугільного зразка. У експерименті було використано пробу вугілля відібрану на шахті «Красноармійська-Західна», пласт d_4 , марка вугілля «Ж». З цільного шматка вугілля було вирізано зразок, товщиною ≈ 10 мм. Підготовлений для проведення досліджень зразок вугілля витриманий за петрографічним складом, представлений, переважно, мікрокомпонентами групи вітриніту – застиглою геліфікованою речовиною, у

молекулярній структурі якої домінують аліфатичні з'єднання, з якими, в першу чергу, пов'язані газогенераційні процеси. Водночас обраний для експерименту зразок кам'яного вугілля структурно неоднорідний, шаруватої будови з мікротріщинами та дефектами, як площинними, так і депланаційними.

Розподіл деформації поверхні і, відповідно, термічних напружень у зразку вугілля дефектної, шаруватої будови простежується за аналізом оптичного зображення та інтерферограми об'єкту досліджень. Два зображення легко зіставити по блискучих сколах кларенових літотипів вугілля позначених на кожному рисунку. Аналіз рисунків дозволяє виділити зони зі смугами з підвищеним градієнтом кольору, які пов'язані з дефектністю будови зразків. «Рухливість» поверхні вугільного зразка, у місцях з максимальним градієнтом кольору, викликана максимальними напруженнями, які сприяють ініціації та розвитку процесів на різних рівнях будови вугілля.

З теорії термопружності відомо, що стан тіла вважається не деформованим за відсутності зовнішніх сил і при певній температурі T_0 . Відтак, якщо $T \neq T_0$, навіть за відсутності зовнішніх сил, тіло буде деформоване внаслідок теплового розширення [Ландау Л.Д. 1987]. В умовах обмеження деформацій, за всебічного стискання у непорушеному вуглепородному масиві, у вугільній речовині будуть виникати термічні напруження. Відповідно під впливом теплового потоку енергія, що необхідна для структурних перетворень накопичується у вугільній речовині на молекулярному рівні у вигляді термічних напружень і може бути розрахована за формулою:

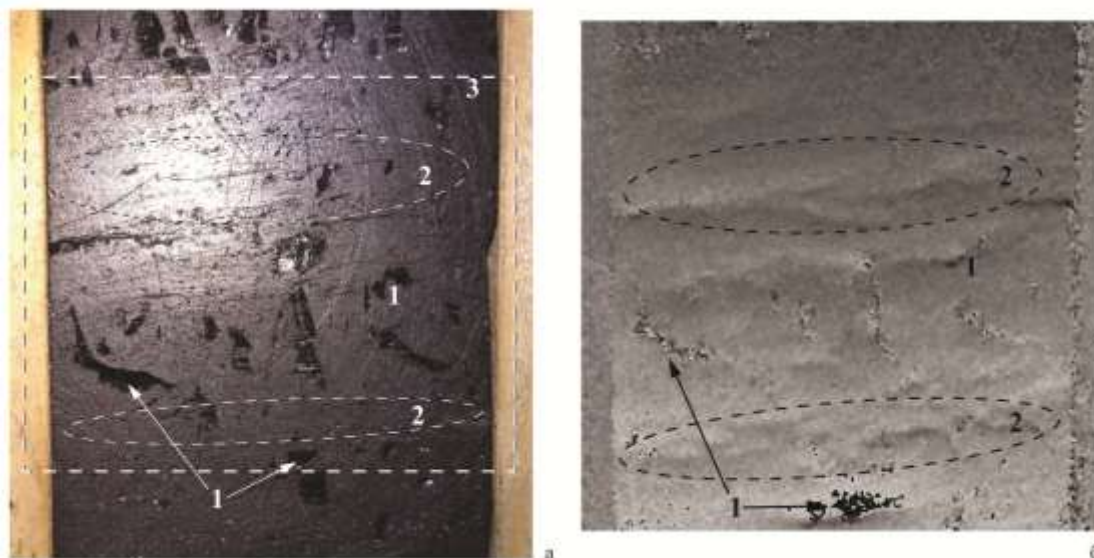
$$\sigma = -\alpha E(T_1 - T_0),$$

де T_1 - температура нагріву; T_0 - початкова температура; α - коефіцієнт лінійного розширення; E - модуль Юнга.

На молекулярному рівні ці напруження сприятимуть фізико-хімічним перетворенням наслідком яких є метаногенерація. В першу чергу виділення низькомолекулярних летких з'єднань з твердої органічної речовини відбувається у зонах структурних дефектів (пор) або вкраплень мінеральних компонентів, які можуть слугувати каталізаторами процесу газогенерації. У свою чергу активація газоутворення, в зонах структурних дефектів з вкрапленням мінеральних, призводить до формування газових «бульбашок» з розвитком газовідвідних каналів, що, в свою чергу, сприяє появі та розвитку тріщин на мікрорівні.

На рис. 3 (front) показано поверхню зразка у двох видах реєстрації зображення. На молекулярному рівні ці напруження сприятимуть фізико-хімічним перетворенням наслідком яких є метаногенерація. В першу чергу виділення низькомолекулярних летких з'єднань з твердої органічної речовини відбувається у зонах структурних дефектів (пор) або вкраплень мінеральних компонентів, які можуть слугувати каталізаторами процесу газогенерації. У свою чергу активація газоутворення, в зонах структурних дефектів з вкрапленням мінеральних домішок, призводить до формування «бульбашок» з розвитком газовідвідних

каналів, що, в свою чергу, сприяє появі та розвитку тріщин на мікрорівні.



1 - блискучі сколи по кларенових літотипах вугілля, 2 - локальна зона смуг з підвищеним градієнтом кольору, 3 - область зняття інтерферограми

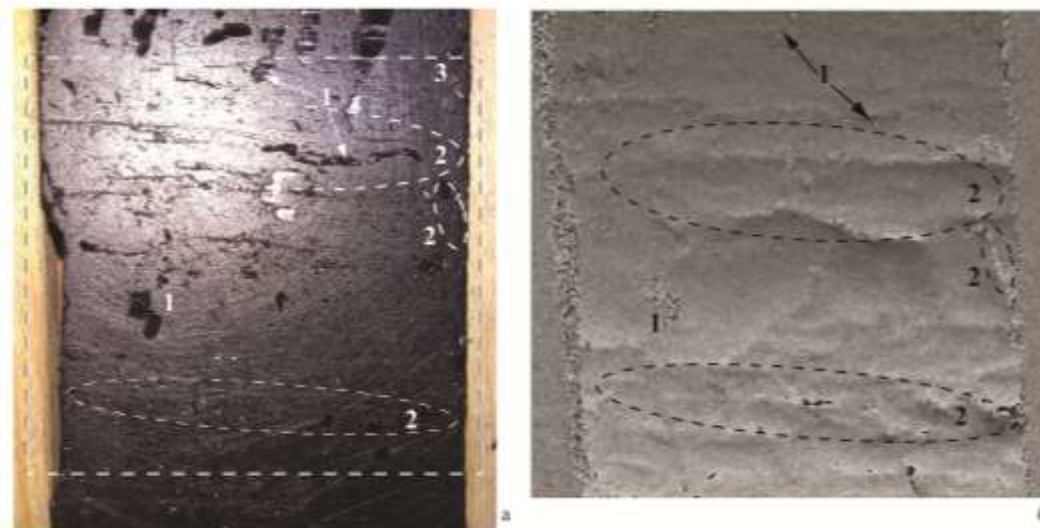
Рисунок 3 - Оптичне зображення (а) та фазова картина (б) зразка (front)

На обох зображеннях (електронному і оптичному) (рис. 3) простежуються блискучі сколи кларенових літотипів вугілля (1), що дає можливість співставляти фотографію (а) і картину деформування (б) зразку внаслідок нагріву. На фазовій картині зони дефектів пов'язані з ділянками з підвищеним градієнтом кольору 2. На оптичному зображенні ці зони не мають видимих особливостей, відповідно дефекти структури вугілля внутрішні (депланаційні). Це можуть бути як внутрішні тріщини між шарами речовини, так і скупчення газових «бульбашок» на зразок наведеного на рис. 2. Незалежно від виду дефекту, під впливом теплового потоку, в зоні 2 виникають термічні напруження, тобто накопичується енергія, яка в подальшому впливатиме на структурні перетворення у метастабільній вугільній речовині.

Подібні симетрично розташовані зони смуг з підвищеним градієнтом кольору і, відповідно, з накопиченою енергією можна виділити також на рис. 4, де представлена зворотна сторона зразка (back).

Метод ширографії дозволяє отримати картину деформування, на якій впевнено простежуються локальні зони пов'язані з внутрішніми тріщинами або з ребрами жорсткості по поверхням контактів шарів речовини. У бездефектних зонах вугільного зразка локальне деформування відсутнє.

Аналіз зображень, отриманих методом електронної ширографії, показав, що при навіть незначному тепловому потоці поверхня зразків деформується, тобто в речовині виникають термічні напруження. В зоні дефектів відбувається накопичення енергії яка в подальшому буде впливати на фізико-хімічні процеси в органічній речовині з низьким бар'єром активації структурних перетворень пов'язаних з генерацією флюїдів і розвитком дефектів.



1 – блискучі сколи по кларенових літотипах вугілля, 2 – локальна зона смуг з підвищеним градієнтом кольору, 3 – область зняття інтерферограми

Рисунок 4 – Оптичне зображення (а) та картина деформування (б) зразка (back)

«Рухливість» речовини у місцях максимального градієнту кольору сприяє проходженню та розвитку процесів газоутворення (утворення тріщин, бульбашок). Тиск розпирання генерованого газу сприяє розвитку тріщин, які стають резервуаром, до якого через газовідвідні канали спрямовується газ з інших «бульбашок». Таким чином процес газогенерації сприяє розвитку тріщинуватості, яка, в свою чергу інтенсифікує виділення газів.

Подібний механізм виділення флюїдів і утворення слідів газогенерації повністю відповідає запропонованій в ІГТМ НАН України моделі фізико-хімічних структурних перетворень метастабільної вугільної речовини [6,7]. За цією моделлю, під зовнішнім термобаричним впливом у вугіллі одночасно зі структурними перетвореннями на молекулярному рівні, з утворенням вільних радикалів, відбувається накопичення енергії у вигляді структурних напружень. Ця додаткова енергія вивільняється системою в процесі релаксації напружень за вільно-радикальним механізмом з виділенням газоподібних продуктів деструкції твердої фази вугілля. При цьому, гази, що утворилися в результаті перетворень впливають на стан речовини і, відповідно, на кінетику процесів у молекулярній структурі вугілля.

За запропонованою фізико-хімічною моделлю формування газоносності вуглепородного масиву відбувається за рахунок газів генетично пов'язаних з виходною органічною речовиною, які утворилися в процесі релаксаційного вивільнення енергії напруженого стану молекулярної структури кам'яного вугілля, що сформувався під дією геомеханічних чинників. Відтак для розвитку процесів газогенерації та появи газових «бульбашок» необхідно створення умов для релаксації енергії термічних напружень. Такі умови виникають внаслідок тектонічних рухів або за кінетичною теорією Я.І. Френкеля в зонах розтягування. Зважаючи на довготривалість та багатofакторність геологічних процесів структурні перетворення у вугільній речовині можна вважати перманентними.

Висновки. Експериментально обґрунтовано джерело енергії за рахунок якої у молекулярній структурі вугільної речовини проходять фізико-хімічні перетворення з виділенням летких низькомолекулярних з'єднань та показано механізми формування слідів газогенерації, у вигляді газових «бульбашок», у твердій органічній речовині на мікрорівні.

Енергія необхідна для активації структурних перетворень, пов'язаних з виділенням газів, може бути накопичена у вугільній речовині у вигляді теплових напружень, релаксація яких відбувається перманентно, у весь період розвитку вуглегазового родовища.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Майборода А.А., Анциферов В.А. Газогенерирующее рассеяное органическое вещество и его распределение в угленосных формациях Донбасса // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. 2007. №1. С. 21–38.
2. Безручко К.А., Барановский В.И. Следы процесса газогенерации Донбасса // Уголь Украины. 2014. №11. С. 31-34.
3. Барановский В.И. Петрографические признаки химической активности углей // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць. Дніпропетровськ, 2010. Вип.88. С. 271–275.
4. Шульга В.Ф., Лукин А.Е., Лелик Б.И. Ископаемые знаки выделения газа в угленосных отложениях Львовско-Волынского бассейна. // Литология и полезные ископаемые. 2000. №5. С. 554–560.
5. Лобанов Л.М., Півторак В.А., Савицький В.В. [та ін.] Оперативный контроль качества и напряженного состояния сварных конструкций методами электронной широкорафии и спекл-интерферометрии // Автоматическая сварка. 2005. №8. С. 39–44.
6. Ulyanova E.V., Malinnikova O.N., Dolgova M.O. [and etc.]. Structure and Methane Content of Fossil Coals // Solid Fuel Chemistry. 2016. Vol. 50. № 4. Pp. 207–212.
7. Bezruchko K.A., Pymonenko L.I., Burchak A.V., Suvorov D.A. Transformation of the energy state of the molecular structure of coal in the process of metamorphism // Journal of geology, geography and geocology. 2018. №27(1). Pp. 30-34.

REFERENCES

1. Mayboroda A.A. and Antsiferov V.A. (2007), "Gas-generating diffuse organic matter and its distribution in coal-bearing formations of Donbass" *Transaction of UkrNDMI*, no.1. pp. 21–38.
2. Bezruchko K.A. and Baranovsky V.I. (2014), "Traces of the gas generation process of Donbass", *Ugol Ukrainy*, no.11, pp.31-34.
3. Baranovsky V.I. (2010), "Petrographic signs of the chemical activity of coal", *Geo-Technical Mechanics*, no.88, pp. 271–275.
4. Shulga V.F., Lukin A.E. and Lelik B.I. (2000), "Fossil signs of gas emission in coal deposits of the Lviv-Volyn basin", *Lithology and minerals*, no.5. p. 554–560.
5. Lobanov L.M., Pivtorak V.A., Savitsky V.V., Tkachuk G.I. and Kiyaneets I.V. (2005), "Express control of quality and stressed state of welded structures using methods of electron shearography and speckle-interferometry", *Paton Welding Journal*, no.8, pp. 35-40.
6. Ulyanova E.V., Malinnikova O.N., Dolgova M.O., Zverev I.V., Burchak A.V., Molchanov A.N., and Pichka T.V. (2016), "Structure and Methane Content of Fossil Coals", *Solid Fuel Chemistry*, Vol. 50, no.4, pp. 207–212.
7. Bezruchko K.A., Pymonenko L.I., Burchak A.V. and Suvorov D.A. (2018), "Transformation of the energy state of the molecular structure of coal in the process of metamorphism", *Journal of geology, geography and geocology*, no.27(1), pp. 30-34.

Про авторів

Барановський Володимир Ігнатович, магістр, молодший науковий співробітник відділу геології вугільних родовищ великих глибин, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, gvrvg@meta.ua.

Савицький Віктор Володимирович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (ІЕЗ НАН України), Київ, Україна, viktor.savitsky@gmail.com

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 НАН України (ІГТМ НАН України) Дніпро, Україна, E-mail: gvrvg@meta.ua.

About the authors

Baranovskyi Volodymyr Ihnatovych, Master of Science, Junior Researcher in Department of Geology of Coal Beds at Great Depths, Institute of Geotechnical Mechanics named by N.S. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, gvrvg@meta.ua.

Savitskyi Viktor Volodymyrovych, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Researcher of Ye.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, (PWI NASU), Kyiv, Ukraine, viktor.savitsky@gmail.com

Burchak Oleksandr Vasylovych, Doctor of Geology (D.Sc.), Senior Researcher, Senior Research in Department of Geology

of Coal Beds at Great Depths, Institute of Geotechnical Mechanics named by N.S. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, E-mail: gvrvg@meta.ua.

Аннотация. Статья посвящена вопросам природы структурных трансформаций, проходящих в твердой составляющей ископаемой органики под внешним тепловым воздействием, в результате которых выделяются летучие низкомолекулярные соединения. В работе приведены результаты экспериментальных исследований газогенерационных процессов в каменном угле методами электронной ширографии и угольной петрографии. Методами петрографии, на образцах угля всех стадий метаморфизма, зафиксировано дефекты строения угольного пласта в виде газовых «пузырьков» с каналом отвода образованных газов. Представлен возможный механизм образования микродефектов угольного пласта. Сделанный вывод основывается на результатах экспериментальных исследований внутренних дефектов в веществе неразрушающими методами контроля по оригинальным методикам Института электросварки им. Е.О. Патона. Методами электронной ширографии, экспериментально доказано, что под влиянием слабых тепловых потоков в угле возникают структурные напряжения связанные с неоднородностью и дефектностью строения вещества. Релаксация энергии этих напряжений, в молекулярной структуре угля, в условиях горного массива, проходит за счет преобразований свободно-радикального характера, которые сопровождаются выделением флюидов. На микроуровне следствием преобразований является формирование газовых "пузырьков" и трещинно-пористой структуры угля. Структурные трансформации в органической составляющей угля проходят в полном соответствии с физико-химической моделью преобразований с выделением газообразных углеводородов. Комплексное использование двух независимых методов исследования позволило установить природу дефектов структуры угольного пласта и определить механизм формирования и развития газовых "пузырьков", как следов генерации твердым угольным веществом летучих низкомолекулярных соединений. В условиях постоянного теплового потока из недр Земли процессы газогенерации в углепородном массиве имеют перманентный характер, но проходят с разной скоростью.

Ключевые слова: каменный уголь, структурные трансформации, газогенерация, электронная ширография, угольная петрография.

Abstract. The article is devoted to origin of structural transformations in the solid component of fossil organic matter under the external thermal influence, which results in release of volatile low-molecular compounds. The paper presents results of experimental studies of gas-generation processes in coal obtained by methods of electronic shearography and coal petrography. The methods of petrography of the coal samples at all stages of metamorphism recorded microdefects of coal bed structure in the form of gas "bubbles" with a channel for generated gases drainage. The possible mechanism of microdefect formation in the coal bed is presented. The conclusion made is based on the results of experimental studies of internal defects in the matter conducted by the non-destructive methods of control according the original methods designed by the E.O. Paton Electric Welding Institute. With the help of the methods of electronic shearography, it was experimentally proved that under the influence of weak heat fluxes in the coal, structural stresses occurred due to the heterogeneity and defect of the matter structure. In the rock massif, energy relaxation of these stresses in the coal molecular structure occurs due to the free radical transformations, which are accompanied by release of the fluids. At the micro level, consequence of the transformations is formation of gas "bubbles" and fractured porous structure of coal. Structural transformations in the coal organic component are in full compliance with the physicochemical model of transformations with release of gaseous hydrocarbons. Combined use of the two independent methods of investigation allowed to determine nature of defects in the coal seam structure and mechanism of formation and dynamics of gas "bubbles" as traces of volatile low-molecular compounds generated by the solid coal substance. In the conditions of constant heat flow from under the Earth's interior, the processes of gas generation in the carbon-bearing massif are permanent, though differ by speed of their development.

Keywords: coal, structural transformations, gas generation, electronic shearography, coal petrography.

Стаття надійшла до редакції 21.06. 2018

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук О.П. Круковським