

В. В. Лукінов, Л. І. Пимоненко, О. В. Бурчак, Д. А. Суворов

Природна енергетична складова в метаноутворенні та розв'язанні газодинамічних явищ

(Представлено академіком НАН України А. Ф. Булатом)

Розглянуто можливість перетворень викопної органіки під збуджуючим впливом зовнішніх чинників (тиск й температура) у процесі формування Донецького басейну. Наслідком дії геодинамічних факторів на вугілля є утворення метану, нагромадження вільної енергії та структуризація з'єднань, збагачених вуглецем в окремих найбільш тектонічно активних зонах. Енергетичний підхід до структурних трансформацій вугільної речовини може стати підставою для розробки нових методів прогнозу утворення викидонебезпечних зон і зон скупчень метану в масиві.

Запропонована нами гіпотеза утворення викодонебезпечних зон у вугільних пластах базується на впливі тектонічних рухів на геохімічні процеси [1]. Згідно з цією гіпотезою, періодичні тектонічні рухи сприяють утворенню в пластах осередків структурно перетвореної вугільної речовини, в яких відбувається нагромадження енергії у вільному і зв'язаному стані. В подальшому нагромаджений енергетичний потенціал сприяє процесам, що відбуваються у вугільному пласті, наприклад газодинамічним явищам (ГДЯ). На сьогодні не існує загальноприйнятих уявлень про час, умови, причини й механізми нагромадження енергії та можливість її збереження в речовині, а отже, дослідження, які проводяться в цьому напрямі, є актуальними.

Мета нашої роботи — формулювання нової концепції формування природної енергетичної складової процесів перетворення вугільної речовини.

Основними видами енергії, що надходить у гірський масив, є теплова та механічна (тектонічна). Джерела енергії можуть бути як зовнішніми — тепловий потік з надр, тектонічні рухи та інші геодинамічні процеси й сили, так і внутрішніми — хімічні та фізико-хімічні перетворення безпосередньо в гірському масиві. Але, по-перше, за час формування вугільних родовищ внесок кожного виду енергії змінюється; по-друге, вуглепородний масив є багатоконпонентною системою, що складається з багатьох підсистем, які по-різному реагують на один і той самий енергетичний вплив, тобто: 1) акумулюють енергію; 2) поглинають її; 3) змінюють структуру або параметри.

Формування структури Донбасу відбувалося в три етапи, які значно відрізнялися своїми термодинамічними умовами [2].

На першому етапі (D_2-P_1) відбувалося нагромадження осадків. Закономірне збільшення гравітаційного тиску і температури з глибиною зумовили зменшення об'єму (у порід приблизно в 2, а вугільних пластів у 5–10 разів) та регіональні перетворення органічних і мінеральних речовин осадової товщі Донбасу. Тектонічні процеси на першому етапі — нерівномірне занурення з короткочасними підйомами і зсувною складовою; переважання умов розтягання, внаслідок яких формувалася система нормальних до напластування

тріщин, що створили систему розкритих каналів, по яких утворений газ виходив з масиву.

Вважається [3], що на першому етапі — від стадії торфоутворення до стадії бурого вугілля — проходили екзотермічні реакції, а при подальшому метаморфізмі вугілля — ендотермічні реакції за допомогою тепла надр. (За розрахунками [3] для утворення марки “А” необхідно — $6,1 \cdot 10^6$ Дж/кг.)

На рівні басейну ці процеси проявилися в закономірному збільшенні ступеня метаморфізму вугілля й катагенезу осадової товщі з глибиною (зменшенні пористості й проникності порід). Але катагенетичні процеси охоплюють не увесь масив (або вугільний пласт) одночасно і не відбуваються всюди однаково. В різних частинах пласта, як в мікро- так і в макрооб'ємах формуються окремі осередки з різним ступенем перетворення.

Важливо зауважити, що внаслідок перетворень більш метаморфізовані ділянки мають менші можливості для подальших трансформацій, а ділянки, де інтенсивність процесів була меншою, — мають більші можливості для реагування на зовнішні умови. Отже, чим більша ступінь перетворення, тим більш стабільна органічна речовина, чим менша, тим більше можливостей для подальших процесів. Детальні теоретичні та експериментальні дослідження найбільш вірогідних структурних трансформацій, які проходили у вугільній речовині, показано в монографії [4]. Оскільки основне перетворення вугільної речовини відбувалося при зануренні басейну, то саме на першому етапі більшою мірою відбулося структурування вугільної речовини та поява осередків з локальними структурними властивостями і різними енергетичними потенціалами.

На другому етапі формування Донбасу (P_2-T) під час інверсії тектонічного руху спостерігався підйом осадової товщі і її руйнування приблизно до половини потужності нагромадження осадків (близько 8 км), що призвело до зменшення гравітаційного тиску та функціонально пов'язаної з ним температури; пласти ущільнилися до сучасного стану і їх об'єм став постійним. Саме з цим етапом пов'язане утворення основних розривних та складчастих порушень осадової товщі та надходження значної механічної енергії.

За приблизними розрахунками енергія, яку отримав масив тільки при підйомі стовпа щільністю $2,2 \text{ г/см}^3$ та площиною 1 м^2 на висоту 5 км, перевищила $22 \cdot 10^9$ Дж/моль. Ще більшу кількість енергії в масив на цьому етапі розвитку Донбасу додали періодично діючий горизонтальний тиск (до 1000 МПа) та локальне збільшення температури (на 50–60 °C) [2], що пов'язані з конвергентними процесами, які відбувалися на південному схилі Східно-Європейської плити.

Раніше експериментально і теоретично було доведено [5], що під впливом сейсмічних й тектонічних рухів у твердій органічній речовині проходять процеси зменшення розмірів складних молекул, у складі вуглеводнів зростає відсоток ароматичних структур, підвищується впорядкованість та структурованість органічної речовини. Частина механічної енергії, що надходить до вугільного пласта, витрачається на утворення дефектів і нових дислокацій, а інша частина запасується та зберігається в структурі за рахунок напружень та деформацій на різних рівнях. Результати експериментів методом ІЧ спектроскопії, що доводять механізми впливу механічного тиску на молекулярну структуру вугілля, демонструє праця [6]. У ході експерименту зареєстровано посування смуг поглинання функціональних груп (зміна частот валентних коливань) та перерозподіл водню в аліфатичній складовій речовині (зміна інтенсивностей смуг поглинання) під впливом механічного стискання. Зафіксовані ефекти є наслідками структурних трансформацій аліфатичної складової вугіль-

ної речовини шляхом перерозподілу атомів водню ($\text{CH}_2 \rightarrow \text{CH}_3$), що викликані напруженим станом хімічних зв'язків під навантаженням. Експериментально доведено, що міграція водню в молекулярній структурі вугілля може бути одним з механізмів генерації метану у вугільних пластах під впливом тектонічних сил.

Під впливом силових навантажень на поверхні дефектів відбувається перетворення механічної енергії в хімічну, при цьому виділяється значна енергія, яка сприяє розриву напружених ковалентних зв'язків, утворенню низькомолекулярних з'єднань та вільних радикалів. Процеси утворення та рекомбінації дефектів також викликають емісію електронів. При взаємодії механічно активованих мінеральних компонентів гірських порід, вуглеводневих сполук і емітованих електронів виділяється атомарний водень (H^\cdot). При наявності в органічній речовині радикалів H^\cdot стають можливими термодинамічно заборонені реакції генерації вуглеводнів [5].

Механізми нагромадження та подальшого впливу теплової енергії на молекулярну структуру кам'яного вугілля досліджувалися за результатами експериментів методом ЕПР спектроскопії [6]. У вугільній речовині (навіть при незначному підвищенні температури до 45°C) впевнено реєструється "ефект локальної активації" як поява енергетичних "згустків" або "енергетичних резервуарів спінової взаємодії". У цих "згустках" енергія акумулюється за рахунок збільшення рівня обмінної взаємодії парамагнітних центрів. Поясненням фізичної природи цього явища може бути злиття, об'єднання сусідніх областей спряження в конденсованій ароматичній складовій вугільної речовини. В стані термічного збудження структури молекули стають більш мобільними, гнучкими, внаслідок чого підвищується компланарність структурних елементів і відповідно зростає взаємодія систем спряження в трьох вимірах. Розраховано [7], що зразком вагою 1 г у вигляді подібних структурних трансформацій при підвищенні температури з 25 до 50°C може бути акумульовано вільної енергії $\approx 5 \cdot 10^{-7}$ Дж. Кількість нагромадженої енергії залежатиме від структурних особливостей та мацерального складу речовини. Нагромадженої таким чином у молекулярній структурі вільної енергії, в умовах підвищених температур та тектонічних навантажень, може бути достатньо для подолання бар'єра активації фізико-хімічних перетворень та радикальних реакцій, наслідком яких буде утворення вільного метану.

Очевидно, що температура та тиск по-різному впливають на міжатомарні зв'язки в молекулах вугільної речовини. Наслідком підвищення температури є збільшення частоти коливань усіх ковалентних зв'язків в молекулі. На відміну від теплової енергії механічна енергія впливає тільки на зв'язки між атомами вуглецю, що створюють остов вуглеводневого з'єднання. Тектонічний вплив — тиск зміцнює міжмолекулярні та міжатомарні зв'язки, збільшує їх кількість, сприяючи переходу вільної енергії в зв'язаний стан [8]. Тобто саме тиск виступає як організуючий чинник, що збільшує приріст вільної енергії взагалі та приводить до зростання потенційної внутрішньої енергії. Поєднання впливів цих двох видів енергії призводить до істотного зменшення енергій активації хімічних реакцій.

Отже, можна зробити висновок, що структурні трансформації вугільної речовини не відбуваються безпосередньо під впливом зовнішніх чинників, а є наслідком релаксації нагромадженої в міжатомарних зв'язках вільної енергії, яка приводить до енергетичних флуктуацій, ізомеризації та розривів внутрішньомолекулярних зв'язків. Зовнішня енергія, в будь-якому вигляді, лише створює умови проходження перетворень, тобто забезпечує спрямованість процесу структурних трансформацій [6].

Таким чином, на другому етапі за рахунок тектонічних сил та підвищення температури відбувалося нагромадження вільної енергії у вигляді “енергетичних резервуарів”. В умовах закритої термодинамічної системи, якою є вугільний пласт в непорушеному гірському масиві, релаксація акумульованої вільної енергії може проходити тільки у вигляді структурних трансформацій на атомно-молекулярному рівні, наслідком яких буде виділення низькомолекулярних з’єднань взагалі й CH_4 зокрема.

Утворені внаслідок таких процесів метан та інші флюїди частково мігрували до денної поверхні. Шляхами їх міграції на цьому етапі слугували зміщувачі розривних порушень (під час їх активізації) та круті пористі пласти порід (пісковики). Вільна енергії акумулювалися у органічній речовині разом з частиною газу, що нагромаджувалася в структурно перетворених осередках, завдяки чому сформувалися викидонебезпечні ділянки вугільних пластів.

На третьому етапі (J – теперішній час) — переважали горизонтальний та вертикальний тиски, викликані конвергентними процесами на півдні Східно-Європейської плити, що активізували зсувні рухи блоків фундаменту, які на північному борті були направлені уздовж простягання басейну, на південному — вхрест простягання. За даними В. Г. Білоня [9], у цей час відбулося 28 тектонічних активізацій. За розрахунками А. В. Полівцева [10], у голоцені відбувався підйом (тобто “закачка” енергії в масив), а на сучасному етапі, за даними замірів [2], найбільші величини мають горизонтальні напруги, що свідчить про різнокомпонентність поля напруг і переважання зсувних процесів у масиві, які є одним з найбільш ефективних способів механічного стимулювання хімічних реакцій (згідно з літературними даними праці М. П. Воларовича, Е. І. Пархоменка, 1956).

Існує припущення [11], що найбільші викиди значною мірою приурочені до активних порушень в осадовій товщі. Для перевірки цього припущення нами побудовано карти розривної дислокованості Донбасу і окремих його районів. Коефіцієнт кореляції між інтенсивністю розривної порушеності (який дорівнює відношенню кількості порушень до площі) і величиною сучасних рухів (амплітуда) дуже низький — 0,24 [2]. Крім того, в Донбасі за результатами досліджень встановлено горизонтальну і вертикальну зональність газоносності відкладів Донбасу [11], виділено зони газодинамічних явищ (ГДЯ) [12]. Узгодженість газових зон і зон ГДЯ пояснюється їх спільною природою — впливом регіональних термодинамічних умов (катагенез). Зіставлення зон глибинних розломів (за даними М. О. Бородуліна [13]) з газовими зонами і зонами ГДЯ свідчить про відсутність будь-якого зв’язку між ними. Тому припущення про значну роль зон глибинних розломів у формуванні викидонебезпечних тріщинуватих ділянок є перебільшенням.

У регіональній структурі Донбасу на цьому етапі істотних змін не відбувалося, можливе утворення малоамплітудних порушень або збільшення параметрів розривних порушень.

На мікрорівні тектонічні процеси призводять до формування внутрішньооб’ємних напруг, розрядження яких викликає утворення мікрodefектів (при цьому кількість вільної енергії, яка потрапляє в пласт, може бути достатньо високою — до $100,5 \cdot 10^3$ Дж/моль [5]). Концентрації порушень є важливою характеристикою ділянки. Зі збільшенням концентрації порушень структура речовини стає більш розущільненою, тому з математичної точки зору ця зона може бути описана як фрактальна. Властивість активно поглинати і тим самим нагромаджувати енергію притаманна саме фрактальним структурам. Причому чим вища щільність дислокацій в площині, тим більша їх енергія і тим менше значення фрактальної розмірності D . Це припущення підтверджується даними, отриманими при вивченні фрактальності мікроструктури вугілля Донецького басейну [14] — фрактальна розмірність у непорушених зонах — 1,89, а в порушених (викидонебезпечних) — 1,76.

Таким чином, на всіх етапах розвитку Донбасу співвідношення між тиском (гравітаційним і тектонічним) та температурою створюють ситуацію, коли паралельно відбуваються два взаємопов'язаних процеси: ущільнення і структуризації речовини, а також деструкції високомолекулярних з'єднань з виділенням флюїдів, у тому числі газоподібних вуглеводневих сполук. Вугільна речовина з початку процесів осадконагромадження постійно знаходиться під збуджуючим впливом зовнішніх чинників (тиску й температури), наслідком дії яких є утворення метану та структуризація з'єднань, збагачених вуглецем. Раптовий викид метану — процес реалізації вільної енергії, що нагромаджується високомолекулярною органічною речовиною вугілля під впливом геодинамічних факторів, у вигляді структурних трансформацій на атомно-молекулярному рівні з активним виділенням низькомолекулярних з'єднань.

1. *Лукинов В. В., Пимоненко Л. І., Бурчак О. В., Суворов Д. А.* Тектоногеохімічна гіпотеза утворення викидонебезпечних зон у вугільних пластах // Доп. НАН України. – 2010. – № 2. – С. 114–118.
2. *Лукинов В. В., Пимоненко Л. І.* Тектоника метаноугольных месторождений Донбасса. – Киев: Наук. думка, 2008. – 352 с.
3. *Бычев Р. М., Петрова Г. И., Бычев М. И.* Термодинамические условия процесса углефикации. – Физ.-техн. пробл. разработки полезн. ископаемых. – 2004. – № 2. – С. 105–110.
4. *Касаточкин В. И., Ларина Н. К.* Строение и свойства природных углей. – Москва: Наука, 1975. – 158 с.
5. *Черский Н. В., Царев В. П., Сороко Т. И., Кузнецов О. Л.* Влияние тектоно-сейсмических процессов на образование и накопление углеводородов. – Новосибирск: Наука, 1985. – 223 с.
6. *Бурчак А. В., Балалаев А. К.* Эффект изменения параметров ИК-спектра углей при механическом давлении в ряду метаморфизма // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць. – Дніпропетровськ: Ін-т геотехн. механіки ім. М. С. Полякова НАН України, 2010. – Вип. 87. – С. 190–198.
7. *Бурчак О. В.* Парамагнітні властивості кам'яного вугілля як показники стану речовини // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць. – Дніпропетровськ: Ін-т геотехн. механіки ім. М. С. Полякова НАН України, 2010. – Вип. 88. – С. 40–45.
8. *Сташук М. Ф.* Термодинамика и ее применение в литологии. – Москва: Наука, 1985. – 221 с.
9. *Белоконь В. Г.* Геологическая история формирования Донбасса // Геология и разведка угольных месторождений. – Москва: Недра, 1971. – С. 3–15.
10. *Полівцев А. В.* Наземні методи в геодинамічному районуванні вугільних родовищ // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць. – Дніпропетровськ: Ін-т геотехн. механіки ім. М. С. Полякова НАН України, 1998. – Вип. 10. – С. 98–105.
11. *Кравцов А. И.* Влияние геологических факторов на распределение природных газов в угольных пластах и вмещающих породах // Газоносность угольных бассейнов и месторождений СССР. – Москва: Недра, 1980. – Т. 3. – С. 74–101.
12. *Забигаїло В. Е.* Геологические основы теории прогноза выбросоопасности угольных пластов и горных пород. – Киев: Наук. думка, 1978. – 163 с.
13. *Бородулин М. И.* Система глубинных разломов по данным глубинного сейсмического зондирования // Геол. журн. – 1976. – № 5. – С. 88–96.
14. *Лукинов В. В., Барановский В. И., Пимоненко Л. И., Кузнецова Л. Д.* Фрактальность микроструктуры угля // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць. – Дніпропетровськ: Ін-т геотехн. механіки ім. М. С. Полякова НАН України, 2010. – Вип. 87. – С. 15–23.

V. V. Lukinov, L. I. Pimonenko, O. V. Burchak, D. A. Suvorov

Natural power constituent in methane formation and the treatment of gas dynamics phenomena

A possibility of transformations of fossil organic matter under the exciting influence of external factors (pressure and temperature) in the process of form of the Donets coal basin is considered. Formation of methane is a result of the action of geodynamic factors on a coal, accumulation of free energy and structurization of compounds enriched by carbon in separate, most tectonic active areas. The energy approach to structural transformations of coal matter can become a basis for the development of new methods of prognosis of the formation of outburst areas and areas of accumulations of methane in a massif.