
Розділ 1. Екологічна безпека

УДК 553.981

© Є.О. Яковлєв, д-р техн. наук

Національний інститут стратегічних досліджень, м. Київ

СТРАТЕГІЧНІ ФАКТОРИ ЕКОЛОГО-ГЕОЛОГІЧНОГО РИЗИКУ ВИДОБУТКУ СЛАНЦЕВОГО ГАЗУ У НАФТОГАЗОНОСНИХ РЕГІОНАХ УКРАЇНИ

У статті проаналізовані стратегічні фактори еколого-геологічного ризику видобутку сланцевого газу у нафтогазоносних регіонах України. Видобуток сланцевого газу на основі фрекінг-технології супроводжується формуванням у глибоких горизонтах на великих площах техногенних проникних високонапірних зон. Їх особливістю є збільшення проникності глибоких водоносних горизонтів та формування висхідної міграції токсичних забруднень із фрекінг-зони у горизонти прісних підземних вод та поверхневі водні об'єкти (ріки, озера, джерела). Актуальними є дослідження з розробки нормативно-правової та науково-методичної бази використання фрекінг-технології експлуатації родовищ сланцевого газу.

Ключові слова: сланцевий газ, фрекінг-технологія, техногенна завантаженість, еколого-геологічний ризик.

Вступ

Сучасна економіка України за оцінками провідних вчених відрізняється аномальним енерго-ресурсоспоживанням, параметри якого в 3–5 разів перевищують показники розвинених країн. Значною мірою це пов'язано з переважанням сировинно-перероблюючих, металургійної та хімічної галузей [1–5].

За наявними оцінками на території України розробляється понад 3000 родовищ мінеральної сировини (97 видів) і зараз функціонує більше 2000 гірничо-видобувних підприємств, екологічний вплив яких має прояв на 20% території держави (забруднення підземних, поверхневих вод та ландшафтів, порушення рівноваги надр).

Середньорічне споживання паливно-енергетичних ресурсів складає до 80 млн. тонн вугілля, 53 млрд. м³ газу, 12 млн. тонн нафти. При цьому до 75% споживання вуглеводнів базується на імпорті, що формує фактор загрози національній безпеці. З видобутком, переробкою і використанням мінерально-сировинних ресурсів (МСР) пов'язано формування до 43–45% ВВП та до 60% експортних надходжень, що є ознаками сировинної економіки.

За оцінками фахівців Держгеолслужби Мінприроди та Національної АН України (проф. Рудько Г.І, к. г.-м. наук Люта Н.Г., проф. Коржнев М.М., проф. Фесик М.А., проф. Міщенко В.С.) більшість розвинутих гірничо-видобувних районів (Донбас, Кривбас, Центральньо-Український уранорудний, Східний та Західний нафто-газовидобувні та ін.) характеризуються незворотними порушеннями та екологічно небезпечними рівнями забруднення навколишнього середовища з одночасною деградацією біосфери, а більшість шахт і кар'єрів досягли критичних глибин (1,5 та 0,4 км, відповідно) при аномальних рівнях енергоємності видобутку МСР на одиницю продукції.

Таким чином, подальший розвиток гірничо-видобувного комплексу України за умов ринкової економіки та зростання конкуренції у надрокористуванні пов'язаний із пошуком нових власних джерел енергетичних ресурсів, в першу чергу вуглеводневих, які мають знижений екологічний вплив та найбільшу здатність до транспортування до об'єктів споживання [1–4].

Принципово нова схема розвитку структури видобутку та використання вуглеводневої енергосировини у світі сьогодні формується на досвіді США з освоєння ресурсів сланцевого та центральноструктурного газу (shale gas, tight gas). За попередніми оцінками, родовища сланцевого газу (СГ) більш-менш рівномірно розповсюджені у надрах більшості держав нашої планети, що створює умови їх ефективного використання при дотриманні технологічних і екологічних параметрів безпеки [2–4, 9, 11, 12].

1. Регіональні перспективи видобутку сланцевого газу в Україні

Значна залежність економічного розвитку України від зовнішніх джерел енергопостачання вимагає від керівництва держави все активніше займатися питаннями енергодиверсифікації. Однією з складових цього процесу є розробка нових родовищ вуглеводнів, зокрема сланцевого газу та газу щільних колекторів тощо. Щодо СГ привабливим є факт формування його покладів в межах більшої частини територій Східного і Західного нафтогазоносних регіонів України, а також наявність розвиненої мережі газопроводів, які можуть забезпечити оперативну доставку видобутого газу. Крім того, це виключає витрати значних коштів для будівництва нових трубопроводів [8, 9, 11, 12].

У квітні 2011 року було оприлюднено аналіз Американської інформаційної енергетичної агенції (U.S. EIA) «Світові ресурси сланцевого газу: аналіз 14 регіонів за межами США». Відповідно до цього документу Україна має досить великі запаси сланцевого газу, поклади якого за геолого-економічними оцінками підрозділів НАН та Держгеолслужби Мінприроди України є перспективними для промислового освоєння (*табл. 1*).

В той же час, загальнодержавний баланс запасів традиційних вуглеводнів в межах геологічних структур України (Східний, Західний, Південний регіони) виглядає досить напруженим (*табл. 2*). Геолого-ресурсна і геолого-економічна складність сучасного видобутку нафти, газу та газоконденсату пов'язана з розробкою малих і глибоких родовищ [5, 7–9, 11, 12].

Таблиця 1 – Порівняння запасів сланцевого газу в країнах Європи з наявними запасами природного газу, виробництвом та споживанням

Держави	2009 р. ринок природного газу, млрд. м ³			Доведені запаси природного газу, млрд. м ³
	виробництво	споживання	імпорт (експорт)	
Франція	0,85	49,00	98%	56,66
Німеччина	14,45	92,63	84%	175,64
Нідерланди	79,04	48,72	(62%)	1388,10
Норвегія	103,40	4,53	(2156%)	2039,66
Великобританія	59,21	88,10	33%	254,96
Данія	8,50	4,53	(91%)	59,49
Швеція	–	1,13	100%	
Польща	5,95	16,43	64%	164,30
Турція	0,85	35,13	98%	5,67
Україна	20,40	44,19	54%	1104,82
Литва	–	2,83	100%	
Інші	13,60	0,27	50%	76,77

Таблиця 2 – Баланс запасів вуглеводнів в геологічних структурах України

Регіони	Розвідані запаси (станом на 2009 р.)			Видобуток з початку роботи		
	Нафта (млн. т)	Газ, млрд. м ³	Газоконденсат, млн. т	Нафта (млн. т)	Газ, млрд. м ³	Газоконденсат, млн. т
Україна	112	1014,5	61,7	315,4		72,6
Східний	65,5	810,7	56,3	205,1		68,6
Західний	40,1	132,8	2,6	110,0	298,2	2,7
Південний	6,4	71,0	2,8	0,3	29,9	1,3

Довідково: Максимум річного видобутку нафти в Україні було досягнуто в 1972 р. (14,4 млн. т), а газу – в 1976 р. (68,3 млрд. м³). Сучасний видобуток нафти стабілізувався на рівні 3,8–4,2 млн. т/рік, а газу – 19,5–20,5 млрд. м³/рік. Враховуючи значний розвиток енергоємних галузей, Україна залишається країною з найбільшим у світі річним споживанням газу на душу населення – до 1,5 тис. м³, що на 30–50% перевищує показники країн ЄС.

На території України розглядається два перспективних регіони з покладами сланцевого газу: Дніпровсько-Донецький та Люблінський із запасами 1,36 трлн. м³ та 4,22 трлн. м³, відповідно (рис. 1).

З цих 5,58 трлн. м³ СГ в кінцевому випадку можуть бути технічно вилучені 1.2 трлн. м³ (до 20%), що дозволить суттєво посилити власну енерго-ресурсну базу вуглеводнів в Україні. За умови використання лише технічно доступного сланцевого газу, на рівні споживання 2012 року, доведених запасів цих ділянок вистачить на 30–35 років.

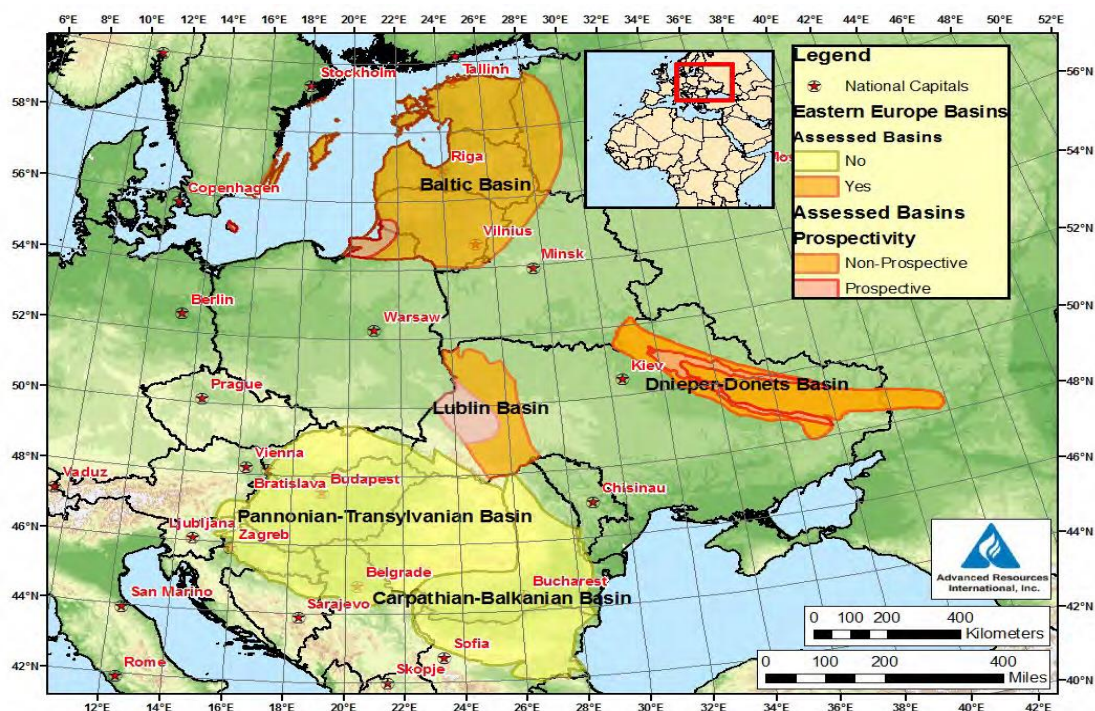


Рис. 1 – Схема розміщення басейнів сланцевого газу в Європі

2. Оцінка екологічної небезпеки техногенних змін стану геологічного середовища у процесі видобутку сланцевого газу

Видобуток СГ пов'язаний із техногенним створенням у стиснутих газоводонасичених шарах, які залягають на глибині 2,5–4,5 км, просторово розвинутих зон високопроникної тріщинуватості. Для цього використовується фрекінг-процес (ФП – frace making), який відрізняється від традиційного гідророзриву високоенергетичним гідрогеомеханічним впливом на слабопроникні газоводонасичені шари шляхом нагнітання у горизонтальні (до 1,0–1,5 км і більше) або нахилені свердловини суміші з води (96–97%), піску (1,5–2%), хімічно- та поверхнево-активних речовин (ПАР).

Аналіз технологічних параметрів ФП (тиски, динаміка пружньо-пластичних деформацій фрекінг-зони, тріщиноутворення та ін.) свідчить, що до основних еколого-техногенних загроз та геолого-економічних ризиків промислової розробки родовищ сланцевого газу у нафтогазоносних структурах України, порівняно з традиційними газовими родовищами, можна віднести наступні:

- 1) великі енергетичні (гідрогеодеформаційні) та фізико-хімічні впливи на глибокі горизонти геологічного середовища, для чого необхідні потужне обладнання, висококваліфікований персонал, нормативно-правова адаптація сучасних технологій та дуже суттєві інвестиції;
- 2) малий строк функціонування експлуатаційних свердловин: навіть новітні технології (горизонтальне буріння, комбінований гідророзрив на основі кульової перфорації та хімічної обробки), які збільшують площу контакту фільтруючої частини свердловини з газоносною породою в 30–50 разів, забезпечують її економічно ефективне функціонування до 3–8 років (для порівняння свердловини з видобутку вільного газу функціонують 10–15 і більше років);

3) підвищена агресивність сланцевого газу до металу (за досвідом промислового видобутку, транспортування та використання у США) призводить до скорочення терміну експлуатації газопроводів до 2 разів та зменшення їх енерговіддачі;

4) зменшення окупності інвестицій до 10–12 років (у ряді регіонів США реальна собівартість сланцевого газу сягає 212–283\$ на 1 тис. м³) порівняно з 5–7 роками при видобутку традиційного газу;

5) на відміну від газonosних площ США, де технологічні параметри геологічного середовища вивчені дуже добре і є сприятливими для видобутку (глибина 1.5–3.0 км, незначна тектонічна порушеність, знижена міцність порід), площі розповсюдження відкладів зі сланцевим газом в Україні не досліджені настільки, щоб можна було з високою вірогідністю оцінювати запаси та витрати на видобуток шляхом побудови вірогідних геолого-економічних та бізнес-моделей, тим більше, що собівартість сланцевого газу сильно залежить від глибини та структурно-геодинамічних умов видобутку [5, 6, 7–12];

6) небезпека довгострокового забруднення підземної гідросфери, в т.ч. стратегічно важливих горизонтів прісних вод питної якості та родовищ лікувальних мінеральних ресурсів, внаслідок формування при використанні фрекінг-процесу деформацій регіональних водотривів, техногенних тріщинно-проникних зон із великою кількістю (тис. м³) токсичних технологічних сполук, радону та природних радіонуклідів, які здатні до міграції у підземні та поверхневі джерела питно-господарського водопостачання;

7) розвиток локальних деформацій денної поверхні та техногенних сейсмо-геофізичних явищ (глибинні гідрогеомеханічні поштовхи);

8) суттєві збільшення еколого-техногенних навантажень на існуючу інженерну інфраструктуру, які обумовлені вилученням значних земельних площ під шляхову, трубопровідну та складську інфраструктуру, залучення з ризиком наступного забруднення великих обсягів водних ресурсів (4–20 тис. м³ на одну видобувну свердловину).

Для забезпечення об'ємного розвитку високопроникної тріщинуватості попередньо виконується просторовий кульовий простріл пристовбурного породного масиву горизонтальних свердловин на глибину до 0,5–0,7 м з наступною закачкою піску та ПАВ. Об'єм закладки технологічного розчину при ФП у 100–120 м секції горизонтальних свердловин сягає 600–1500 м³, а витрати часу 3–7 годин; при цьому величина тиску P_0 переважно визначається двома складовими: геостатичним тиском (вагою) вищезалягаючих порід та їх міцністю на розрив перпендикулярно нашаруванню $\sigma_{\perp}$:

$$\text{таким чином } P_0 = \gamma z + \sigma_{\perp},$$

де γ , h – відповідно, середня об'ємна вага та товщина шару порід, що залягають вище горизонту СГ, $\gamma = 2,2 \text{ т/м}^3$, розрахункове значення $h = 3000\text{--}5000 \text{ м}$;

$\sigma_{\perp}$ – значення міцності осадових ущільнених порід на розрив перпендикулярно нашаруванню; за дослідними даними $\sigma_{\perp} = 150\text{--}250 \text{ кг/см}^2$ (15–25 МПа).

У відповідності з вищенаведеними параметрами тиск ФП сягає 800–1400 кг/см² (80–140 МПа), що забезпечує просторовий розвиток газо-водопроникних тріщин на відстань від 150–250 м до 350–500 м (2%), інжекцію в їх простір 150–250 м³ кварцового піску на

1 видобувну свердловину для забезпечення довгострокового збереження розкриття та газоводопроникнення тріщин.

Слід відмітити, що реологічне (дуже повільне) стискання тріщинно-порового простору фрекінг-зони (ФЗ) зменшує у часі його проникність і тому економічно ефективно функціонування свердловин на СГ сягає у середньому 3–5–7 років (термін експлуатації свердловин на традиційний газ дорівнює 10–15–25 років). У зв'язку з цим відбувається збільшення питомої щільності видобувних свердловин на родовищах СГ (до 6–15 св/км²), що створює у продуктивних горизонтах регіональні пластово-тріщинні системи та зони деформацій регіональних перекриваючих водотривів з ризиком їх локальних руйнувань. Це суттєво порушує еколого-гідрогеологічні умови товщ розповсюдження СГ, які відносяться до зон уповільненого водообміну (ЗУВ) високомінералізованих вод (300–350 г/дм³), і формує ризики їх техногенної міграції до вищезалігаючих горизонтів прісних вод (до 1–3 г/дм³) зони активного водообміну (ЗАВ).

В цілому у процесі техногенної еволюції гідрогеофільтраційної системи ФЗ можна виділити 3 фази:

1) просторового розвитку вздовж стовбура горизонтальної або нахиленої свердловини за умови пружно-пластичних деформацій мережі проникних тріщин, відкритість яких фіксується піщаним матеріалом при одночасному заповненні токсичним технологічним розчином; у процесі розвитку фрекінг-тріщинуватості існує ризик руйнівних деформацій вищезалігаючих слабопроникних шарів та периферійного розвитку гідравліко-фільтраційного зв'язку ФЗ з проникними тектонічними зонами. Останнє є основою формування інжекційного висхідного потоку токсичних технологічних забруднень до прісноводних горизонтів ЗАВ;

2) площадної висхідної гідрогеоміграції у вигляді повільного дифузійно-конвективного потоку залишків маломінералізованих технологічних розчинів під впливом реологічного скорочення тріщинного простору ФЗ та їх зменшеної густини ($\gamma_{\text{пв}} = 1000 \text{ кг/м}^3$) порівняльно з мінералізованими ($M = 00\text{--}400 \text{ кг/м}^3$) поровими розчинами ($\gamma_{\text{мв}} = 200 \text{ кг/м}^3$); екологічно небезпечною складовою даної фази розвитку ФЗ можна вважати поступове забруднення порових розчинів вищезалігаючих горизонтів ЗУВ та ЗАВ.

3) розвитку у ФЗ гідрогеодеформаційного поля пружних напружень з накопиченням потенційної енергії та ризиком деформацій денної поверхні або проявів техногенних мілкофокусних землетрусів.

Далі наводяться орієнтовні експертні оцінки часових і енергетичних показників вищезазначених ефектів еволюції ФЗ з урахуванням гідрогеофільтраційних і геодинамічних процесів.

1. Ризик формування гідравліко-фільтраційного зв'язку ФЗ з проникними тектонічними структурами оцінюється за результатами дешифрування матеріалів ДЗЗ і визначення «питомої щільності» мережі лінеаментних структур (рис. 1, 2).

За результатами математичної обробки знімків ДЗЗ в районі першої пошукової свердловини (акад. Лялько В.І., д.г.н. Азімов О.Т.) на Юзівській площі питома щільність лінеаментних зон склала 0,25 км/км².



Рис. 1 – Фрагмент «Карта розривних порушень та основних зон лінеamentів у зоні дослідної свердловини на сланцевий газ (Юзівська площа, Харківська обл.)» М 1: 1000000 [Крылов Н.А. и др., 1988]



Рис. 2 – Збільшений фрагмент схеми результатів регіонального структурного дешифрування радіолокаційних даних ДЗЗ на фоні синтезованого сканерного багатозонального КЗ LANDSAT ETM+ із супутника «LANDSAT-7» від 01.06.2002 р. (7-ий, 4-ий і 2-ий канали, псевдокольори ; акад. НАНУ Лялько В.І., д.г.н. Азімов О.Т.)

Лінійна щільність техногенної тріщинуватості Φ_3 у типовому кластері (США, штат Пенсільванія) із 6 горизонтальних свердловин (рис. 3) складає 1,5–3,0 км/км², тобто від 3 до 6 разів більше.

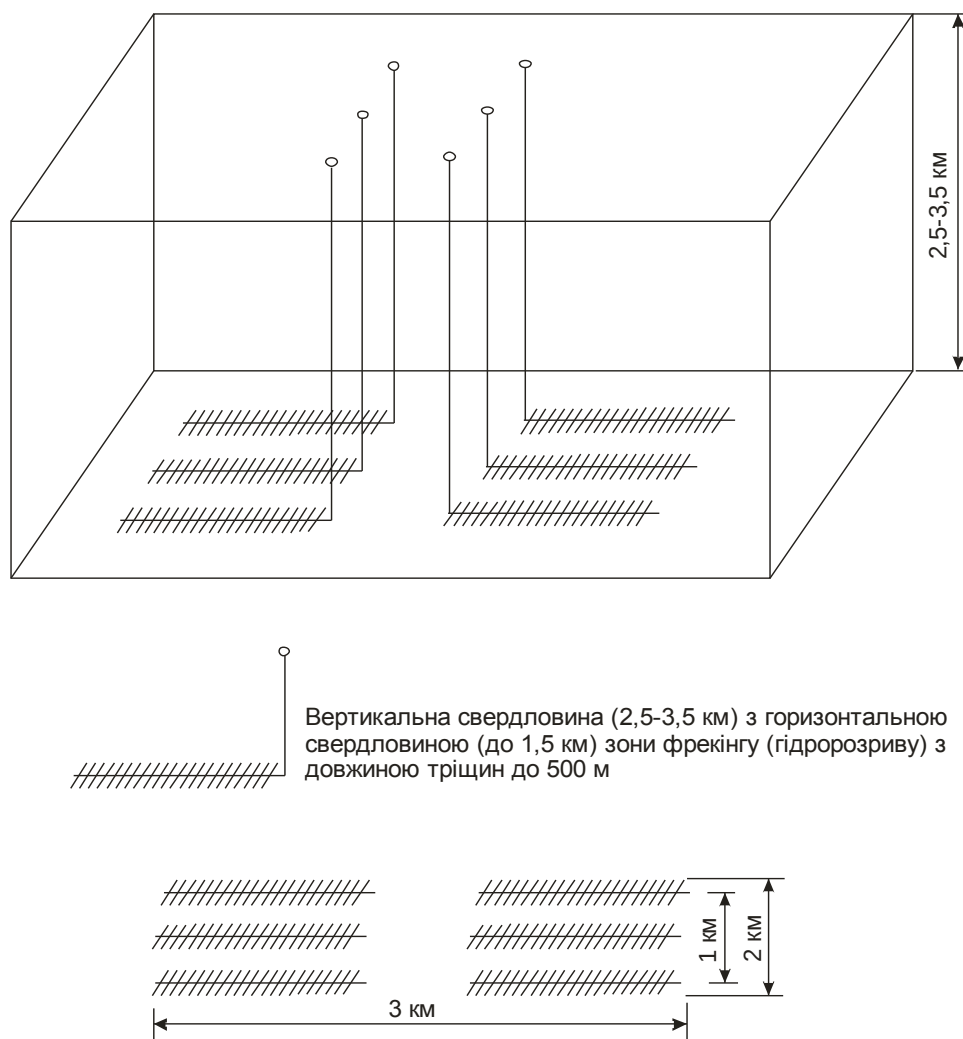


Рис. 3 – Типова схема кластера видобувних свердловин (штат Пенсільванія)

Результати розрахунку за вищенаведеною схемою свідчать про суттєве зростання вразливості до забруднення горизонтів прісних підземних водних об'єктів в межах нафтогазоносних структур внаслідок дії чинників фрекінг-процесу. Наявні регіональні оцінки за даними математичного моделювання водо-теплопереносу (акад. НАНУ Лялько В.І., акад. НАНУ Шестопапов В.М., к. г.-м. н. Литвак Д.Р. та ін.), проникності ($K_T = 10^{-4}$ м/добу) і активної пористості ($n_T = 10^{-3}$) тектонічних зон дозволяють виконати орієнтовний розрахунок часу висхідної міграції забруднень t_m із фрекінг-зони на глибині $H_{фз} = 3000$ м до ґрунтового водоносного горизонту (ГрВГ).

Згідно із залежністю Дарсі $t_m \approx H_{фз}/V_m$, де V_m – середня швидкість висхідної міграції забруднень технологічного розчину. Середнє значення V_m може бути розраховано за рівнянням $V_m = K_T/i/n_T$, де i – градієнт висхідного потоку у гідравліко-фільтраційній системі «зона

фрекінгу – проникна тектонічна структура», n_T – активна пористість тектонічної зони. За даними математичного моделювання водо-теплопереносу у глибоких горизонтах ЗУВ $n_T = 10^{-3} \div 10^{-4}$.

Допускаючи лінійне зниження у часі тиску у фрекінг-зоні від початкового ($P_0 = \gamma_n H + \sigma_{\perp}$) до гідростатичного, при якому зупиняється вивільнення сланцевого газу, визначимо середню величину тиску висхідної міграції:

$$P_{\text{сер}} = [(\gamma_n H_{\text{фз}} + \sigma_{\perp}) + H_{\text{фз}}]/2,$$

де γ_n – об’ємна густина порід, $\gamma_n \approx 2,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$;

$H_{\text{фз}}$ – середня глибина фрекінг-зони (процесу); $H_{\text{фз}} = 3000 \text{ м} = 300 \text{ МПа}$;

$\sigma_{\perp}$ – міцність сланцево-газоносних порід на розтягіння (розрив) нормально нашаруванню; за літературними даними $\sigma_{\perp} \approx 25 \text{ МПа} (300 \text{ кг/см}^2)$.

У відповідності з вищенаведеними даними величина градієнту висхідної міграції буде дорівнювати

$$i = P_{\text{сер}}/H_{\text{фз}} = [(\gamma_n H_{\text{фз}} + \sigma_{\perp}) + H_{\text{фз}}]/2H_{\text{фз}} = [(660 + 300) + 300]/2 \cdot 300 \approx 2,1$$

а час досягнення ГрВГ

$$t_m = H_{\text{фз}}/(k_i/n_T) = 3000/[(10^{-4} \cdot 2,1)/(10^{-3} \div 10^{-4})] \approx 14,2 \cdot 10^3 \div 1420 \text{ діб} \approx 40 \div 4 \text{ років}.$$

Слід відмітити, що орієнтовні оцінки часу можливої висхідної міграції технологічних забруднень із ФЗ співпадають з терміном експлуатації фрекінг-зони ($t_{\mu} \geq 5$ років) та з проявами у США численних локальних забруднень підземних і поверхневих джерел водопостачання ($t_b > 20 \div 30$ років).

2. Орієнтовний час площадної висхідної міграції технологічних забруднень ФЗ крізь суцільний породний масив оцінюються з умови, що рушійним фактором висхідної гідрогеоміграції у даному випадку є різниця густини прісноводного технологічного розчину ($\gamma_{\text{пв}} = 1000 \text{ кг/м}^3$) та мінералізованих порових розчинів газовміщуючих порід ($\gamma_{\text{пор}} = 1200 \text{ кг/м}^3$).

При глибині фрекінг-зони $H_{\text{фз}} = 3000 \text{ м}$ і лінійному зниженні різниці щільності в інтервалі «зона фрекінгу – ГрВГ» середнє значення градієнту висхідної фільтрації складе

$$i_{\phi} = (\gamma_{\text{пор}} - \gamma_n)H_{\text{фз}}/2H_{\text{фз}} = 0,1.$$

За формулою Дарсі час висхідної фільтрації у суцільному породному масиві складе

$$t_{\text{пм}} = H_{\text{фз}}[(k_m \cdot i_{\phi})/n_{\text{пм}}],$$

де $k_{\text{пм}}$ – середня проникність суцільного породного масиву від фрекінг-зони до ГрВГ;
 $n_{\text{пм}}$ – активна пористість суцільного породного масиву (за даними лабораторних досліджень та математичного моделювання глибоких горизонтів ЗУВ, в т. ч. полігонів захоронення токсичних стоків $n_{\text{пм}} = 10^{-3}$;
за формулою Тіма-Каменського

$$k_{\text{пм}} = H_{\text{ФЗ}} / [(m_{\text{пр}}/k_{\text{пр}} + m_0/k_0)],$$

де $m_{\text{пр}}$ – товщина проникних шарів, $m \approx 500\text{м}$,
 $k_{\text{пр}}$ – середній коефіцієнт фільтрації проникних шарів, $k_{\text{пр}} = 2,0$ м/добу;
 m_0, k_0 – відповідно, середні значення товщини і коефіцієнтів фільтрації слабопроникних (розділяючих) шарів (т. зв. регіональних водотривів); сумарна товщина $m_0 = (3000 - 500)2500$ м,
 $k_0 = (2 \div 5) \cdot 10^{-5}$ м/добу (за даними Климчука А.Б. щодо проникності карстово-провідних систем).

Тоді $k_{\text{пм}} \approx 3000 / [(500/2) + (2500/(2 \div 5) \cdot 10^{-5})] = 2,4 \cdot 10^{-5} \div 6 \cdot 10^{-5}$ м/добу, а орієнтовний час висхідної (дифузійно-конвективної) міграції технологічних забруднень крізь суцільний породний масив складе $t_{\text{пм}} = 3000 / [(2,4 \cdot 10^{-5} \div 6 \cdot 10^{-5}) \cdot 10^{-1}] / 10^{-3} = 2500 \div 63000$ діб $\approx 70 \div 170$ років. Слід прийняти до уваги, що в умовах ГС існує можливість значного зниження концентрації забруднень за рахунок впливу сорбції і регіонального руху підземного потоку у системі горизонтів ЗАВ.

Отримані оцінки швидкості висхідної міграції технологічних забруднень по проникних тектонічних зонах (від перших років до десятків) та крізь суцільний породний масив (від десятків до сотень років) є орієнтовними, враховуючи прискорення висхідних потоків внаслідок утворення у зоні фрекінгу газово-водної емульсії, в'язкість якої у десятки разів менша. Тому прискорений висхідний рух із ФЗ вуглеводневих газів є фактором, який здатний призвести до зміни структури газогеохімічного поля у верхній зоні геологічного середовища, в першу чергу внаслідок прискореної міграції газів по тектонічних і послаблених (лінеаментних) зонах. Таким чином, виявлення у початкову фазу проведення фрекінг-процесу зміни фонові структури газогеохімічного поля є ознакою порушення гідрогеофільтраційної ізолюваності ФЗ, а також небезпеки забруднення горизонтів прісних підземних вод і поверхневих водних об'єктів.

Ризик геопросторового забруднення підземної гідросфери на площах видобутку СГ
уявляється доцільним додатково оцінити за консервативною балансовою схемою співвідношення об'єму води для розчину забруднень $Q_{\text{бр}}$ до безпечних концентрацій $C_{\text{гдк}}$ з об'ємом порових розчинів $V_{\text{пор}}$, які залягають вище ФЗ:

$$Q_{\text{бр}} = V_{\text{бр}} / C_{\text{гдк}} \leq V_{\text{пм}} \cdot n_{\text{пм}},$$

де $V_{\text{бр}}, V_{\text{пм}} \cdot n_{\text{пм}}$ – відповідно, питомі об'єми остаточних токсичних розчинів у ФЗ та порових вод у перекриваючому ФЗ породному масиві $\text{м}^3/\text{км}^2$; за даними [2, 3] $V_{\text{бр}} \sim 400 \text{м}^3/\text{км}^2$,

у більшості випадків $C_{гдк} \sim 1.0\text{--}0.1 \text{ мг/дм}^3$ (відносна доля $10^{-6}\text{--}10^{-7}$), при глибині $\Phi 3 = 3000 \text{ м}$
 $V_{пм} = 3 \cdot 10^9 \text{ м}^3/\text{км}^2$;

$n_{пм}$ – загальна пористість порід вище $\Phi 3$, $n_{пм} = 0.2$.

Із результату вирішення вищенаведеної балансової залежності слідує, що

$$Q_{бр} = 400/(10^{-6}\text{--}10^{-7}) = 4 \cdot 10^8\text{--}4 \cdot 10^9 \text{ м}^3,$$

а об'єм порових вод вище $\Phi 3$

$$V_{пм} \cdot n_{пм} = 3 \cdot 10^9 \cdot 0.2 = 6 \cdot 10^8 \text{ м}^3.$$

Таким чином, залишки технологічних розчинів у $\Phi 3$ в окремих випадках здатні до довгострокового забруднення підземних вод ЗУВ та ЗАВ.

З метою визначення площ ділянок, які мають мінімальний ризик забруднення підземних і поверхневих вод при використанні технології фрекінга, нами була виконана геопросторова оцінка співвідношення площ оптимальних кластерів видобувних свердловин на сланцевий газ та питомої щільності лінеаментів за даними ДЗЗ (рис. 1–3). Отримані результати засвідчили, що екологічно безпечні ділянки з видобутку СГ в межах Юзівської площі складають 60–65%, а Олеської – 45–55%, що обумовлено підвищеною тектонічною порушеністю останньої.

Отримані дані дозволяють дійти висновку про доцільність випереджаючого районування територій пошуково-розвідувальних робіт на сланцевий газ за геодинамічною стійкістю на основі комплексного аналізу матеріалів ДЗЗ та газогеохімічної зйомки.

3. Накопичення потенціальної енергії у фрекінг-зоні у процесі гідрогеомеханічних деформацій стискання та формування тріщинуватої системи за наявним досвідом (США, Британія) може сягати величини провокування вертикального зміщення локальних породних масивів по площині тектонічних і послаблених зон, в т.ч. у вигляді сейсмострушувань. В загальному плані кількість потенційної енергії у фрекінг-зоні дорівнює

$$E_{пот} = \rho_{фп} V_{ф},$$

де $\rho_{фп}$ – середній тиск фрекінг-процесу, для глибини 3000 м $\rho_{фп} = 90 \text{ МПа}$ (900 кг/см^2);

$V_{ф}$ – середній об'єм закачки технологічного розчину у свердловину з тиском $\rho_{фп}$,
 $V_{ф} \approx 10 \cdot 10^3 \text{ м}^3$;

$E_{пот} = 90 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 10^4 \text{ м}^3 \approx 0,9 \cdot 10^{12} \text{ Дж}$.

Згідно із залежністю, що наведена у [7], вищезазначений енергетичний рівень струшування (подрібнення) породного масиву є еквівалентним землетрусу магнітудою 3,5–4 (4–5 балів шкали МСК-64). Слід відмітити, що подібний рівень сейсмострушувань на ділянках видобутку сланцевого газу відмічався у США, Англії та на полігонах захоронення токсичних стоків (США, Росія та ін.).

Висновки і рекомендації

1. Фрекінг-технологія є досконалою технологією щодо вилучення вуглеводнів із глибоких шарів (2,5–4,5 км) слабопроникних порід шляхом їх гідрогеомеханічного подрібнення і створення високопроникних довгоіснуючих (до 5–8 років) зон, заповнених механічними домішками і токсичними технологічними розчинами.

2. Створення глибинних високопроникних фрекінг-зон призводить до довгострокових порушень геомеханічної цілісності, геоенергетичної і гідрогеофільтраційної рівноваги глибоких горизонтів геологічного середовища.

3. Видобуток сланцевого газу на основі фрекінг-технології супроводжується формуванням у глибоких горизонтах на великих площах (сотні-тисячі кв. км) техногенних проникних високонапірних зон. Їх особливістю є збільшення проникності глибоких водоносних горизонтів та формування висхідної міграції токсичних забруднень із фрекінг-зони у горизонти прісних підземних вод та поверхневі водні об'єкти (ріки, озера, джерела).

4. Площинне формування при видобутку сланцевого газу високопроникних тріщинних зон призводить до гідрогеофільтраційної і геохімічної перебудови глибинних горизонтів високомінералізованих вод, зони уповільненого водообміну та багаторазової активізації їх взаємодії з вищезалігаючими прісноводними горизонтами та поверхневими водними об'єктами.

5. Тріщинно-поровий простір фрекінг-зон є колектором великих залишкових об'ємів токсичних технологічних розчинів, які здатні до масштабного просторово-часового забруднюючого впливу на горизонти прісних вод і поверхневі водні об'єкти.

6. Провідними шляхами прискореної міграції токсичних технологічних забруднень із зон техногенного тріщиноутворення при видобутку сланцевого газу є проникні тектонічні порушення, які найбільш вірогідно діагностуються за матеріалами ДЗЗ та газогеохімічних зйомок.

Приймаючи до уваги великий енергопотенціал сланцевого газу в межах нафтогазоносних структур Східного та Західного регіонів України, їх значну структурно-тектонічну порушеність, техногенну навантаженість та підвищену екологічну чутливість геологічного середовища до механічних, фізичних та хімічних чинників впливу фрекінг-технології, уявляється необхідним виконання:

1) Випереджаючої оцінки тектонічної порушеності (суцільності) породного масиву в межах сланцевогазоносних структур на базі аналізу матеріалів ДЗЗ та визначення структури газогеохімічного поля ділянок пошуково-розвідувальних робіт на сланцевий газ.

2) Удосконалення структури моніторингу параметрів газогеохімічного поля, рівневого і хімічного режиму підземних і поверхневих вод, геохімічного стану ландшафтів в межах родовищ сланцевого газу.

3) Досліджень сорбційно-десорбційних властивостей мінерального скелету і порових розчинів породного масиву над зоною крекінга з метою визначення захисної здатності геологічного середовища на ділянках видобутку сланцевого газу.

4) Розробки математичних моделей техногенно-геологічних систем (ТГС) «зона фрекінгу – геологічне середовище» з метою визначення гранично-припустимих параметрів

фрекінг-процесу на стадіях геолого-пошукових і експлуатаційних робіт, а також прогнозу довгострокового впливу залишків токсичних технологічних розчинів у фрекінг-зоні на якість підземних і поверхневих вод.

5) Досліджень з розробки нормативно-правової та науково-методичної бази щодо використання фрекінг-технології при геологічному вивченні та експлуатації родовищ сланцевого газу.

Список використаної літератури

1. Адаменко О.М. Екологічні проблеми розвідки і видобутку сланцевих газів на Олеській площі. Екологічне та збалансоване ресурсокористування, 2013, № 2 (8), С. 4–12.
2. Довгий С.О., Євдощук М.І., Коржнев М.М. та ін. Енергетично-ресурсна складова розвитку України. Київ, Ніка-Центр, 2010, 263 с.
3. Якушенко Л.М., Яковлев Є.О. Перспективи видобутку сланцевого газу в Україні: екологічні аспекти. Аналітична записка НІСД, 2012, 12 с.
4. Рябцев Г.Л., Сапегін С.В. (ред.). Сучасні проблеми державної політики у сфері видобутку нетрадиційних вуглеводнів в Україні. Київ, НТЦ «Психея», 2012, 239 с.
5. Довгий С.О., Коржнев М.М., Курило М.М. та ін. Екологічні ризики, збитки та раціональні межі використання надр в Україні. Київ, Ніка-Центр, 2012, 316 с.
6. Лялько В.І., Попов М.А. Спутниковые методы поиска полезных ископаемых (2-е изд.). Карбон-ЛТД, Киев, 2012, 436 с.
7. Ломниц Ц., Розенблют (ред.) Сейсмический риск и инженерные решения. Москва, «Недра», 1981, 683 с.
8. Рудько Г.І. (ред.) Геолого-економічна оцінка родовищ корисних копалин України та проблеми надрокористування (зб. наукових праць). Київ-Чернівці, «Букрек», 2013, 307 с.
9. Шестопалов В.М. (ред.) Водообмен в гидрогеологических структурах Украины. Водообмен в гидрогеологических структурах и Чернобыльская катастрофа: в 2 книгах. Киев, «Карбон-ЛТД», 2001, 860 с.
10. Лукін О.Ю., Щукін М.В. Проблеми нафтогазоносності великих глибин / Проблеми нафтогазоносності глибоко занурених горизонтів осадових басейнів України. Зб. наук. праць. – Івано-Франківськ: Факел, 2005. – С. 18–21.
11. Price L.C. Organic geochemistry of core samples from an ultra-deep hotwell (300°C, 7 km) // Chemical Geology. – 1982. Vol. 37. – № 3/4. – P. 215–228.
12. Гожик П.Ф. и др. Нефть и природный газ на континентальном склоне Европы / Геология и полезные Мирowego океана, 2010, № 1. – С. 5–47.

Стаття надійшла до редакції 09.01.14 українською мовою

© Е.А. Яковлев

**СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ДОБЫЧИ
СЛАНЦЕВОГО ГАЗА В НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ РЕГИОНАХ УКРАИНЫ**

В статье проанализированы стратегические факторы эколого-геологического риска добычи сланцевого газа в нефтегазоносных регионах Украины. Добыча сланцевого газа на основе фрекинг-технологии сопровождается формированием в глубоких горизонтах на больших площадях техногенных проницаемых высоконапорных зон. Их особенностью является увеличение проницаемости глубоких водоносных горизонтов и формирование восходящей миграции токсичных загрязнений из фрекинг-зоны в горизонты пресных подземных вод и поверхностные водные объекты (реки, озера, источники). Актуальны исследования по разработке нормативно-правовой и научно-методической базы использования фрекинг-технологии эксплуатации месторождений сланцевого газа.

© E.O. Yakovlev

**STRATEGIC FACTORS OF ECOLOGICAL AND GEOLOGICAL HAZARD SHALE GAS
IN THE OIL AND GAS REGION UKRAINE**

This paper analyzes the strategic factors of ecological and geological risk of shale gas in the oil and gas regions of Ukraine . Extraction of shale gas based freking-technology is accompanied by the formation of deep levels in large areas of permeable man-made high-pressure zones. It's feature is the increase in the permeability of the deep aquifer formation and upward migration of toxic contaminants from freking-zone horizons in fresh groundwater and surface water (rivers, lakes, springs). Relevant research is to develop the regulatory and methodological framework using technology frekinh exploitation of shale gas.