

*І. Г. ЗЕЗЕКАЛО, Г. А. ДУМЕНКО*

### **ПРОБЛЕМИ ВИКОРИСТАННЯ ПНЕВМОРОЗРИВУ ДЛЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ВИДОБУТКУ ВУГЛЕВОДНЕВОЇ СИРОВИНИ НА ГАЗОКОНДЕНСАТНИХ РОДОВИЩАХ УКРАЇНИ**

Висвітлено сучасний стан нафтогазової галузі України та можливості нарощення вуглеводневої бази через введення в розробку родовищ з ущільненими колекторами, які містять значні газові ресурси. Розглянуто окремі методи інтенсифікації роботи свердловин, які використовуються в Україні, такі як гідравлічний розрив пласта та метод GasGun. Наведено основні їх недоліки: непередбачувані ситуації розгерметизації водного горизонту, використання великих об'ємів води, утилізація технологічної води, неповний вихід рідини розриву з колектора, набухання та гідратація глинистих складових колектора, неможливість використання при надвисоких температурах і тисках. Висвітлено світові сучасні технології, основані на дії інертних газів при видобутку вуглеводнів. Проаналізовано дослідження із застосування безводних розривів порід та методи інтенсифікації з використанням інертних газів. Приведено застосування методу пневматичного розущільнення вугільних пластів в Україні з використанням топкових газів для вивільнення метану та дегазації вугільних шахт. Наведено сучасні дослідження з використання рідкого азоту та зрідженого вуглекислого газу як агентів розриву порід з низькими фільтраційно–емнісними властивостями. Наведено основні переваги використання азоту, зрідженого та надкритичного вуглекислого газу у якості агентів розущільнення колекторів. Запропоновано дослідити метод пневматичного розущільнення на різних зразках породи у лабораторних умовах з використанням різних агентів та поверхнево–активних речовин, підібрати відповідні реагенти та розробити технологію пневматичного розриву колекторів вуглеводнів як дешевшої та екологічно безпечної альтернативи існуючим методам.

**Ключові слова:** інтенсифікація; пневморозрив; підвищення нафтогазовіддачі; інертні газ; азот; вуглекислий газ.

*І. Г. ЗЕЗЕКАЛО, А. А. ДУМЕНКО*

### **ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПНЕВМОРАЗРЫВА ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ДОБЫЧИ УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ НА ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ УКРАИНЫ**

Освещено современное состояние нефтегазовой отрасли Украины и возможности наращивания углеводородной базы из-за введения в разработку месторождений с уплотненными коллекторами, которые содержат значительные газовые ресурсы. Рассмотрены отдельные методы интенсификации работы скважин, которые используются в Украине, такие как гидравлический разрыв пласта и метод GasGun. Приведены основные их недостатки: непредвиденные ситуации разгерметизации водного горизонта, использование больших объемов воды, утилизация технологической воды, неполный выход жидкости разрыва из коллектора, набухание и гидратация глинистых составляющих коллектора, невозможность использования при сверхвысоких температурах и давлениях. Освещены мировые современные технологии, основанные на действии инертных газов при добыче углеводородов. Проанализированы исследования по применению безводных разрывов пород и методы интенсификации с использованием инертных газов. Приведено применение метода пневморазуплотнения угольных пластов в Украине с использованием топковых газов для высвобождения метана и дегазации угольных шахт. Приведены современные исследования по использованию жидкого азота и сжиженного углекислого газа в качестве агентов разрыва пород с низкими фильтрационно–емкостными свойствами. Приведены основные преимущества использования азота, сжиженного и сверхкритического углекислого газа в качестве агентов разуплотнения коллекторов. Предложено исследовать метод пневморазуплотнения на разных образцах пород в лабораторных условиях с использованием различных агентов и поверхностно–активных веществ, подобрать соответствующие реагенты и разработать технологию пневморазрыва коллекторов углеводородов как дешевой и экологически безопасной альтернативы существующим методам.

**Ключевые слова:** интенсификация; пневморазрыв; повышение нефтегазоотдачи; инертные газы; азот; углекислый газ.

*I. H. ZEZEKALO, H. A. DUMENKO*

### **PNEUMATIC FRACTURING PROBLEMS FOR HYDROCARBON FEEDSTOCK PRODUCTION INTENSIFICATION AT GAS CONDENSATE FIELDS IN UKRAINE**

The current state of the oil and gas industry of Ukraine and the possibility of increasing the hydrocarbon base due to the introduction of fields with compacted reservoirs, which contain significant gas resources. Some methods of intensification of wells that are used in Ukraine, such as hydraulic fracturing and the GasGun method, are considered. Their main shortcomings are given: unforeseen situations of depressurization of the water horizon, use of large volumes of water, utilization of process water, incomplete release of rupture fluid from the reservoir, swelling and hydration of clay components of the reservoir, impossibility of use at extremely high temperatures and pressures. The world modern technologies based on the action of inert gases in hydrocarbon production are covered. Studies on the application of anhydrous rock breaks and intensification methods using inert gases are analyzed. The application of the method of pneumatic compaction of coal seams in Ukraine with the use of flue gases for the release of methane

© І. Г. Зезекало, Г. А. Думенко, 2021

and degassing of coal mines is presented. Modern studies on the use of liquid nitrogen and liquefied carbon dioxide as fracturing agents with rocks with low filtration–capacity properties are presented. The main advantages of using nitrogen, liquefied and supercritical carbon dioxide as reservoir decompression agents are presented. It is proposed to study the method of pneumatic compaction on different samples of rocks in the laboratory using various agents and surfactants, select the appropriate reagents and develop technology for pneumatic rupture of hydrocarbon reservoirs as a cheap and environmentally friendly alternative to existing methods.

**Key words:** intensification; pneumatic fracturing; increased oil and gas recovery; inert gases; nitrogen; carbon dioxide.

Перспективи розвитку нафтогазової галузі України в основному пов'язуються з відкриттями нових родовищ вуглеводнів [1], а наразі – відкриттям родовищ на великих глибинах, оскільки на глибинах до 5000 м великі та крупні родовища нафти і газу вже розвідані та знаходяться на завершальних стадіях розробки. Хоча геологічний прогноз, який свого часу був виконаний для ДДЗ, полягає у тому, що близько ще 40 % вуглеводнів є ресурсним потенціалом [2], але за останні десять років не було відкрито жодного великого родовища на значній глибині, а усі відкриті родовища є дрібними чи невеликими за запасами. Тому нарощення вуглеводневого потенціалу слід розглядати через призму застосування вторинних методів підвищення нафтогазовилучення, введення ефективних технологій розробки покладів, особливо покладів з важковидобувними запасами (представлені низькопроникними колекторами). Ресурсна база газу ущільнених колекторів (газ вугільних пластів, газ центрально-басейного типу) в Україні за приблизними обрахунками складає близько 8 млрд. м<sup>3</sup>. Такі обсяги не можуть бути проігноровані та вимагають розробки заходів, спрямованих на освоєння даного перспективного ресурсу вуглеводнів.

Зниження дебітів та загалом падіння видобутку на родовищах, що знаходяться в освоєнні, спостерігається через ряд факторів: погіршення фільтраційно–смісних характеристик колектора у привибійній зоні пласта у результаті кольтатації пласта як у процесі буріння, так і в процесі експлуатації, заводнення пласта, випадання конденсату у рідкій фазі через зниження тиску до тиску початку конденсації тощо [3, 15]. Це також призводить до необхідності проектування додаткових методів дії на пласт з метою збільшення нафто- і газовіддачі.

А отже, особливо актуальним питанням сьогодення є впровадження сучасних методів інтенсифікації роботи свердловини. Тому метою даної статті є аналітичні дослідження ефективності та доцільності застосування окремих методів інтенсифікації видобутку вуглеводнів.

Інтенсифікація видобутку вуглеводнів включає широкий спектр заходів: солянокислотну обробку, кислотні ванни, термокислотну обробку, гідравлічний розрив пласта, гідропікоструминну перфорацію, або ж комплекс цих заходів. Кожен з цих методів дії на

пласт має свої переваги і недоліки та використовується з огляду на геологічні умови та технічний стан окремо взятої свердловини.

Основним методом інтенсифікації на сьогодні є гідророзрив пласта (ГРП), за допомогою якого можна «реанімувати» свердловини та вивести їх на високі та стабільні дебіти. Але як і кожен метод, ГРП має свої недоліки: непередбачувані ситуації розгерметизації водного горизонту, розташованого поруч [4, 14], великі об'єми води, необхідні для гідророзриву, особливо при застосуванні технології обробки «slickwater», утилізація цієї технологічної води, а також неповний вихід рідини розриву на поверхню з колектора, що в разі знижує ефективність ГРП, набухання та гідратація глинистих складових колектора.

Аналогом гідророзриву є сучасна технологія GasGun, яка на противагу ГРП є більш економічно вигідним заходом з інтенсифікації роботи свердловини, але недоліком даної технології є те, що її можна застосовувати до глибин 5400 м при максимальній температурі 140 °С. Тобто при наявності надвисоких тисків і температур на площі технологія GasGun буде малоефективною.

Метою даної роботи є наукове обґрунтування та розробка методу пневморозриву вуглеводневого пласта із застосуванням інертних газів.

Застосування газоподібних агентів для розриву пласта є найбільш перспективним напрямком з удосконалення методів дії на пласт, а також є новим для України. Має ряд переваг:

- відсутність необхідності утилізації великих об'ємів технологічної води;
- дешевизна при застосуванні інертних газів;
- відсутність рідини, що лишається у колекторі після розриву;
- збільшення видобутку через вплив CO<sub>2</sub> на матрицю породи.

Роботи по пневморозриву пласта проводилися у межах України у 80-ті рр. XX століття при дегазації вугільних пластів Донбасу. Так, роботи з пневмоущільнення вугільних колекторів велися за допомогою спеціальних перфоративів, але такий метод мав ряд недоліків, основним з яких було закачування у пласт повітря, яке, з'єднуючись з метаном вугільного пласта, утворював вибухонебезпечну суміш.

Було розроблено та запатентовано [5] більш досконалий спосіб пневморозуцільнення вугільних пластів – буріння з поверхні кількох вертикальних свердловин, утворення на вибої порожнин, які утворюються вибухом чи спалюванням зарядів вибухових речовин, та наступне закачування через насосно-компресорні труби інертного газу у пласт для подальшої дегазації вугільних пластів. Даний метод не потребує використання спеціального перфоратора та проведення досліджень з метою встановлення орієнтації створюваної щілини, а також не відбувається утворення вибухонебезпечної газоповітряної суміші.

Також дана технологія є шляхом для утилізації топкових газів, що утворюються при роботі ТЕС і ТЕЦ – спалювання різних видів палива у своєму складі має  $\text{CO}_2$ , який і може бути використаним у якості агента для дегазації вугільних пластів.

Сьогодні дослідження та використання пневморозриву проводяться у США, Канаді, Китаї та Росії.

Дослідження впливу газових агентів на систему «порода–флюїд» та їх застосування почалося ще в середині минулого століття [13].

Зокрема, у Радянському Союзі та США відбувалися дослідження методу High–Energy Gas Fracturing (HEG) ще у 1960–70-х рр. як лабораторно, так і у свердловинах [6]. Це спеціально розроблений метод імпульсного розриву з використанням пропелентів, який застосовувався у свердловинах на природний газ. При цьому відбувається численний радіальний розрив і утворені радіальні тріщини поєднуються з природними, що особливо ефективно у тріщинуватих колекторах. Використовувався цей метод для видалення забруднень у привибійній зоні пласта та збільшення проникності колектора. Від водного ГРП відрізняється більшою екологічністю, простотою у реалізації та дешевизною.

У Канаді з 80–х рр. минулого століття застосовується технологія розриву пінною сумішшю вуглекислого газу та азоту [7]. При цьому рідина для розриву являє собою суміш рідкого азоту чи вуглекислого газу, загущувача та хімічних реагентів. Після того, як рідина розриву з розклинюючим агентом надходить у пласт, рідкий інертний газ переходить у газовий стан. Цей метод особливо підходить для пластів з низьким тиском і проникністю, що чутливі до води.

У Китаї такі дослідження з газовими агентами починаються з 1985 р. спочатку в необсаджених, а потім у обсаджених свердловинах. З початком «сланцевої революції» у окремих регіонах Китаю виникла гостра необхідність у безводному розриві пластів – були розвідані великі запаси сланцевого газу (близько

31 трлн.  $\text{м}^3$  видобувних ресурсів), але брак води та геологічні ускладнення не дозволяють розпочати масштабний видобуток. Тому до розриву залучаються інертні гази.

Так, за результатами досліджень впливу зрідженого азоту на породу було встановлено, що зразки порід, які піддавалися обробці азотом, мають більшу крихкість, більшу ступінь порушеності та більшу щільність утворених тріщин [8].

У Росії кілька років тому було розроблено технологію «Крио Фрэкинг» [9] – це вид безводного розриву пластів (сухого фрекінгу або сухого ГРП) із застосуванням зрідженого азоту.

Дана технологія заснована на синтезі двох фізичних явищ: кріостатичне розширення пластового флюїду при замерзанні в мікротріщинуватих породах на рівні матриці, з метою руйнування міжкристалічних зв'язків і висипання продуктів обробки в утворені пори, тобто процес інтенсифікації тріщин; термодинамічне розширення рідкого азоту, що замкнутий на вибої, при випаровуванні під впливом пластової температури (даний процес супроводжується інтенсивним зростанням тиску), що призводить до розвитку і розширенню тріщин у породі.

Технологія безводного розриву із застосуванням зрідженого вуглекислого газу є альтернативою традиційному ГРП при розкритті сланцевих порід, так як вони містять велику кількість глинистого матеріалу, схильного до набухання [10, 16, 17, 18]. При цьому вуглекислий газ вводиться у пласт у зрідженому вигляді, а виноситься у газоподібному стані. Це дозволяє пришвидшити виніс рідини розриву з пласта, не допустити блокування тріщин рідиною розриву, зміни змочуваності породи та погіршення фільтраційних властивостей колектора.

При використанні зрідженого  $\text{CO}_2$  є кілька важливих переваг:

- використовується безводна фаза – рідиною розриву є 100 % рідкий діоксид вуглецю, що не закупорює пласти і тріщини;

- за рахунок теплообміну і дифузії після розриву рідкий  $\text{CO}_2$  швидко виноситься у газовій фазі, немає залишкової рідини гідророзриву у пласті;

- у порівнянні зі звичайною рідиною розриву, час виносу скорочується, а отже вартість обладнання для виносу знижується, і не потрібне очищення винесеної рідини.

Технологія розриву з використанням надкритичного  $\text{CO}_2$  розроблена китайським вченим Шень Чжунхоу. Використання такої рідини розриву відбувається при тиску, а часто і температурі, які

вище критичних параметрів для  $\text{CO}_2$ . У цьому діапазоні при підвищенні тиску збільшується щільність  $\text{CO}_2$ . При цьому властивості надкритичного  $\text{CO}_2$  знаходяться між властивостями рідини та газу. Надкритичний  $\text{CO}_2$  має здатність до більш швидкого масового пересування і має більш високий коефіцієнт дифузії. Перехід діоксиду вуглецю в надкритичний стан відбувається при досить низькому тиску (7,38 МПа) і температурі (31,04 °С).

Є ряд переваг у використанні надкритичного  $\text{CO}_2$ :

- при розриві не використовується вода, це допомагає подолати чутливість глинистих мінералів до води і запобігти кольматації колекторів;

- низька в'язкість, високий коефіцієнт дифузії, поверхневий натяг близький до нуля. Тому у вузькому просторі надкритичний  $\text{CO}_2$  може створити більш ефективні мікротріщини, перемістити метан з пор і тріщин, підвищити газовіддачу;

- низький поріг тиску руйнування порід, швидкість розриву підвищується, скорочуються терміни – спостерігається значна економія коштів;

- економія водних ресурсів – технологія не потребує наявності води;

- технологія розриву надкритичним  $\text{CO}_2$  екологічно сприятлива, так як у пласт не вводять ніяких хімічних добавок, молекули  $\text{CO}_2$  займають вихідний простір молекул  $\text{CH}_4$  і захоронюються в щільних низькопроникних сланцях.

А отже, при пневморозриві окрім економічної вигоди, економії часу також може вирішуватися питання секвестрування вуглекислого газу у масиві породи [11] і зменшення його кількості у атмосфері та пом'якшення парникового ефекту.

Детальна інформація про дослідження, що пов'язані зі зрідженим азотом/вуглекислим газом і проводяться зарубіжними нафтогазовими компаніями, у відкритому доступі практично відсутні. Є лише обмежені дані про діяльність в цьому напрямку компаній «Halliburton» і «AirProducts».

Випробування даними компаніями проводились на сланцевих пластах родовищ Grundmann, Rodvelt. Основним напрямком досліджень є розрив пласта рідким азотом, в тому числі сланцевих порід, з низькими фільтраційно–смісними властивостями, у виснажених газових колекторах, в регіонах з відсутністю водних ресурсів і нерозвиненою інфраструктурою.

Аналогічні роботи проводилися агентством «RPSEA» (проект «Colorado») шляхом закачування рідкого азоту в свердловину в два етапи. Ціль проекту «Colorado» була досягнута, вплив рідкого азоту в

пласті та його здатність до розриву пласта підтвердилися. Були заплановані подальші експерименти у 2015 році з використанням обладнання зі спеціальних сталей і термоізоляційних матеріалів, результатів по цих дослідженнях поки що не виявлено.

Дослідження із застосуванням  $\text{CO}_2$  відбувалися також у Китаї у 2019 році [12]. На прикладі 5 свердловин при польових дослідженнях було продемонстровано ефективний розрив та утворення змішаних тріщин, що об'єдналися у складні системи, та збільшення видобутку щільної нафти у 4–20 разів. При цьому  $\text{CO}_2$  розчиняється у нафті і зменшує її в'язкість, сприяючи кращому притоку до вибоїв свердловин.

Нещодавно проектом CCS Boundary Dam та проектом CCS Petro Nova було продемонстровано вловлювання  $\text{CO}_2$  з промислових газових відходів у масштабі мільйону тон в рік. Затрати на вловлювання можна нівелювати при використанні цього газу у якості агенту пневморозриву колекторів вуглеводнів.

Виходячи з представлених даних можна говорити не тільки про зростання інтересу нафтогазових компаній до нових технологій підвищення дебіту, але і до широкого застосування інертних газів як агентів інтенсифікації при розробці вуглеводневих родовищ.

**Висновки.** Підсумовуючи наведене вище, нами встановлено, що традиційний метод ГРП для розуцільнення колекторів вуглеводнів має ряд важливих недоліків (дороговартісність, необхідність у великих об'ємах води, кольматація пласта при наявності глинистої фази, недоцільність використання при низьких пластових тисках, екологічні ризики). Застосування технології GusGun можливе лише у неускладнених геологічних умовах, що майже неможливо для ДДЗ, оскільки більшість свердловин буриться на значну глибину, де спостерігаються наявність АВПТ та високих температур. Дешевшою та більш екологічно безпечною альтернативою розуцільнення щільних колекторів вуглеводнів може бути пневморозрив пласта з використанням інертних газів та вловлюваних димових газів, що суттєво зменшить екологічне навантаження на атмосферу.

Метою подальших досліджень поставлено опрацювання ряду невирішених питань при застосуванні пневморозриву пластів–колекторів. На наш погляд даний метод потребує розробки індивідуального підходу до кожного родовища і свердловини, та, особливо, до кожної окремо взятої геолого–промислової ситуації. Зважаючи на це, планується проведення досліджень із

застосування пневморозушлінення у лабораторних умовах на різних зразках порід, використання при даному методі поверхнево-активних речовин та інших агентів і дослідження їх впливу на нафтогазовіддачу порід, підбір реагентів та розробка й впровадження технології пневморозриву для окремо взятого родовища.

Очевидно, що межі застосування пневморозриву будуть окреслюватися створенням реальних тисків розриву пластів за допомогою сучасної техніки із забезпеченням безаварійності проведення даної операції та загалом безпечності. Тому однією із задач дослідження також є визначення ефективних меж застосування методу пневморозриву зі встановленням критично можливої глибини, визначення типу колектора, який буде найбільш ефективно піддаватися пневморозушліненню, а також визначення критичних тисків і температур, при яких даний метод буде дієвим і безпечним.

На основі отриманих результатів буде виведено підсумовуючі критерії ефективності застосування методу пневморозриву щільних порід-колекторів та рекомендацій по подальшому впровадженню даного методу у практичне застосування на нафтогазових родовищах.

#### Список літератури

1. Українська нафтогазова енциклопедія [Текст] : енциклопедія / ред.-упорядник В. С. Іванишин. Львів, СПОЛОМ, 2015. 604 с.: [32] табл., [10] іл.
2. Думенко Г. А. Заходи, спрямовані до нарощення вуглеводневого потенціалу України [Текст]. Теорія і практика актуальних наукових досліджень. Матеріали IV науково-практичної конференції. Ч.1. (22–23 лютого 2019 р., м. Дніпро.). Херсон : Видавничий дім «Гельветика», 2019. С. 61–63.
3. Яремійчук Р. С., Яремійчук Я. С. Освоєння свердловин : довідник. Львів : Центр Європи, 2007. 367 с.
4. Прогресс Технологий. Фрекинг или гидроразрыв пласта: технология, история, оборудование. URL: <https://proteh.org/articles/09042015-freking-ili-gidrorazryv-plasta-tehno/> (дата звернення: 20.02.2019).
5. Гошовський С. В. Зезекало І. Г., Пасічник В. Д. Пат. 48284, Україна. Спосіб пневморозушлінення вугільних пластів. 2010.
6. Weiyu Yang, Chunhu Zhou, Fadong Qin, Dang Li. High-Energy Gas Fracturing (HEGF) Technology: Research and Application. *Society of Petroleum Engineers*, 1992. P. 285.
7. Zifeng Li, Hongfang Xu, Chaoyue Zhang. Liquid nitrogen gasification fracturing technology for shale gas development. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 138 (2016). p. 253–256.
8. Feng Gao, Chengzheng Cai, Yugui Yang. Experimental research on rock fracture failure characteristics under liquid nitrogen cooling conditions. *Results in Physics*, V. 9, 2018. p. 252–262.
9. Инновации и изобретения: Кристо фрекинг – ГПП без воды. URL: [http://xn--80ayfipd.xn--p1ai/novosti/innovacii-izobreteniya-krio-](http://xn--80ayfipd.xn--p1ai/novosti/innovacii-izobreteniya-krio-freking.html)

10. Циу Пин. Разработка методики выбора технологий гидравлического разрыва пласта для добычи сланцевого газа: диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук: 25.00.17. Москва, 2017. 167 с.
11. Кауфман. Л.Л., Кулдыраев Н. И., Лысиков Б. А. Добыча сланцевого газа: обзор зарубежного опыта [монография] / под. общ. ред. Л. Л. Кауфмана. Донецк : Донбасс, 2011. 262 с.: рис.
12. X. Song, Y. Guo, J. Zhang. Fracturing with Carbon Dioxide: From Microscopic Mechanism to Reservoir Application. *Joule*, V. 3, 2019. P. 1913–1926.
13. Bullen, R.S.; Lillies, A.T. ( to L HB Investment Inc ). Carbon dioxide fracturing process and apparatus. US Patent 4,374,545. 22 Feb 1983. Priority date 28 Sep 1981, Canada , в р . PAT – APPL – 337743.
14. Кочергин М.А. Технологические подходы к разработке ресурсов сланцевого газа / М.А. Кочергин // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник), № 3, 2018. – с. 158–178 / научный мультидисциплинарный журнал.
15. Стер Д.О. Вплив стану фільтраційної характеристики при вибійній зоні багатощарових пластів на ефективність розробки нафтових і газових родовищ / Д.О. Стер, І.Й. Рибичич. – Львів: Ліга-Прес, 2003. – 116 с.
16. Rogala A, Krzysiek J, Bernaciak M, Hupka J. Non-aqueous fracturing technologies for shale gas recovery. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, V. 49 (1), 2012. P. 313–322.
17. CO<sub>2</sub> as a fracturing fluid: Potential for commercial-scale shale gas production and CO<sub>2</sub> sequestration / Richard Middleton, Hari Viswanathan, Robert Currier, Rajan Gupta // *Energy Procedia*, V. 63, 2014. P. 7780–7784.
18. Middleton, R. S. et al. Shale gas and non-aqueous fracturing fluids: Opportunities and challenges for supercritical CO<sub>2</sub> // *Applied Energy*, Elsevier, V. 147(C), 2015, P. 500–509.

#### References (transliterated)

1. Ukrainys'ka naftohazova entsyklopediya [Tekst] : entsyklopediya [Ukrainian oil and gas encyclopedia]. L'viv, SPOLOM Publ., 2015. 604 p.
2. Dumenko H. A. Zakhody, spryamovani do naroshchennya vuhlevodnevoho potentsialu Ukrainy [Tekst]. Teoriya i praktyka aktual'nykh naukovykh doslidzhen' [Measures aimed at increasing Ukraine's hydrocarbon potential]. Materialy IV naukovopraktychnoyi konferentsiyi. Ch.1. (22–23 lyutoho 2019 r., m. Dniro.). [Theory and practice of current research. Proceedings of the IV scientific-practical conference. Part 1 (22–23 February 2019, Dniro)]. Kherson, Hel'vetyka Publ., 2019. P. 61–63.
3. Yaremychuk R. S., Yaremychuk Y. S. Osvoyennya sverdlovin : dovidnyk [Well development: a handbook]. L'viv, Tsentrvyevropy Publ., 2007. 367 p.
4. Progress Tekhnologiy. Freking ili gidrorazryv plasta: tekhnologiya, istoriya, oborudovanie [Fracking or hydraulic fracturing: technology, history, equipment]. Available at: <https://proteh.org/articles/09042015-freking-ili-gidrorazryv-plasta-tehno/> (accessed 20.02.2019).
5. Hoshovs'kyy S. V. Zezekalo I. H., Pasichnyk V. D. Pat. 48284, Ukrainya. Sposib pnevmorozushchil'nennya vuhil'nykh plastiv. 2010.
6. Weiyu Yang, Chunhu Zhou, Fadong Qin, Dang Li. High-Energy Gas Fracturing (HEGF) Technology: Research and Application. *Society of Petroleum Engineers*, 1992. P. 285.
7. Zifeng Li, Hongfang Xu, Chaoyue Zhang. Liquid nitrogen gasification fracturing technology for shale gas development.

- Journal of Petroleum Science and Engineering, 138 (2016). p. 253–256.
8. Feng Gao, Chengzheng Cai, Yugui Yang. Experimental research on rock fracture failure characteristics under liquid nitrogen cooling conditions. *Results in Physics*, V. 9, 2018. p. 252–262.
  9. Innovatsii i izobreteniya: Krio freking – GRP bez vody [Innovations and inventions: Cryo fracking – Frac without water]. Available at: <http://xn--80ayfipd.xn--p1ai/novosti/innovacii-izobreteniya-krio-freking.html> (accessed 23.02.2019).
  10. Tsiu Pin. Razrabotka metodiki vybora tekhnologiy gidravlicheskogo razryva plasta dlya dobychi slantseвого gaza: dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kand. tekhn. Nauk [Development of a methodology for selecting hydraulic fracturing technologies for shale gas production. Candidate eng. sci.diss. (Ph.D.)]. Moscow, 2017. P.167.
  11. Kaufman. L.L., Kuldyrkaev N. I., Lysikov B. A. Dobycha slantseвого gaza: obzor zarubezhnogo opyta [Shale Gas Production: Review of Foreign Experience]. Donetsk, Donbass Publ., 2011. 262 p.
  12. X. Song, Y. Guo, J. Zhang. Fracturing with Carbon Dioxide: From Microscopic Mechanism to Reservoir Application. *Joule*, V. 3, 2019. P. 1913–1926.
  13. Bullen, R.S.; Lillies, A.T. ( to L HB Investment Inc ). Carbon dioxide fracturing process and apparatus. US Patent 4,374,545. 22 Feb 1983. Priority date 28 Sep 1981, Canada , vp . PAT – APPL – 337743.
  14. Kochergin M.A. Technological approaches to the development of shale gas resources / M.A. Science. Technology. Technologies (Polytechnic Bulletin), No. 3, 2018. – p. 158–178 / scientific multidisciplinary journal.
  15. Yeher D.O. Vplyv stanu fil'tratsiyanoi kharakterystyky pry vybiynoyi zony bahatosharovykh plastiv na efektyvnist' rozrobky naftovykh i hazovykh rodovyshch / DO. Yeher, I.Y. Rybnych. – L'viv: Liha–Pres, 2003. – 116 s.
  16. Rogala A, Krzysiek J, Bernaciak M, Hupka J. Non-aqueous fracturing technologies for shale gas recovery. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, V. 49 (1), 2012. P. 313–322.
  17. CO<sub>2</sub> as a fracturing fluid: Potential for commercial-scale shale gas production and CO<sub>2</sub> sequestration / Richard Middleton, Hari Viswanathan, Robert Currier, Rajan Gupta // *Energy Procedia*, V. 63, 2014. P. 7780–7784.
  18. Middleton, R. S. et al. Shale gas and non-aqueous fracturing fluids: Opportunities and challenges for supercritical CO<sub>2</sub> // *Applied Energy*, Elsevier, V. 147(C), 2015, P. 500–509.

Надійшла (received) 25.02.2021

#### *Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Зезекало Іван Гаврилович (Зезекало Иван Гаврилович, Zezekalo Ivan Havrylovych)** – доктор технічних наук, професор, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», професор кафедри нафтогазової інженерії та технологій навчально-наукового інституту нафти і газу; м. Полтава, Україна; Тел.: +38(050)305–12–68; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9962-6905>; e-mail: 2012.nadra@gmail.com

**Думенко Ганна Анатоліївна (Думенко Анна Анатольевна, Dumenko Hanna Anatoliyivna)** – Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», аспірантка кафедри нафтогазової інженерії та технологій навчально-наукового інституту нафти і газу; м. Полтава, Україна; Тел.: +38(067)697–81–04; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5468-0484> e-mail: laithemmer@gmail.com.