УДК 622.276.66

Інтенсифікація видобутку вуглеводнів на пізній стадії розробки родовищ: комбіновані методи (ТБХО, ГРП) і невирішені питання

Бахшієв Ф.З., *аспірант,* *ORCID ID 0009-0002-9170-0661, farizbakhshiev@ukr.net;*
Римчук Д.В., *к. тех. н., ORCID ID 0000-0002-1750-9140, danilorymchuk@gmail.com,*
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Розглянуто сучасний стан методів інтенсифікації видобутку вуглеводнів на пізній стадії розробки родовищ України, коли значна частка залишкових запасів зосереджена в низькопроникних колекторах, а експлуатація ускладнюється кольматацією привибійної зони, відкладеннями парафінів, асфальтенів і смол (АСПВ), обводненням. Наведено порівняльну характеристику гідродинамічних, хімічних, теплових та комбінованих методів і обмежень їх застосування. Розглянуто фізико-хімічні основи термохімічної обробки (ТХО), зокрема її термобарохімічного різновиду (ТБХО), особливості рідин гідравлічного розриву пласта (ГРП), взаємозв'язок розчинення породи-колектора та зміни її фільтраційних властивостей. За результатами огляду наукових і патентних джерел встановлено, що питання сумісності реагентів ТБХО з різними типами рідин ГРП висвітлено переважно якісно, без кількісних даних про інтенсивність екзотермічної реакції залежно від послідовності введення компонентів. Сформульовано невирішені питання та завдання подальших досліджень.

Ключові слова: інтенсифікація видобутку, термобарохімічна обробка, гідравлічний розрив пласта, рідини ГРП, пізня стадія розробки.

Hydrocarbon production stimulation at the late stage of field development: combined methods (TBCT, hydraulic fracturing) and unresolved issues

Bakhshiiev Fariz Zakir Ohly, *postgraduate student, ORCID ID 0009-0002-9170-0661, farizbakhshiev@ukr.net;*
Rymchuk Danylo, *Cand. Sci. (Eng.),* *ORCID ID 0000-0002-1750-9140, danilorymchuk@gmail.com,*
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

The current state of hydrocarbon production stimulation methods at the late stage of field development in Ukraine is considered, when a significant share of remaining reserves is concentrated in low-permeability reservoirs, and well operation is complicated by near-wellbore damage, asphaltene-resin-paraffin deposits (ARPD), and water cut. A comparative characterization of hydrodynamic, chemical, thermal and combined methods and their limitations is given. The physicochemical basis of thermochemical treatment (TCT), including its thermobarochemical variant (TBCT), the features of hydraulic fracturing fluids, and the relationship between rock dissolution and changes in filtration properties are reviewed. The review of scientific and patent sources shows that the compatibility of TBCT reagents with different types of fracturing fluids is covered mostly qualitatively, without quantitative data on the intensity of the exothermic reaction depending on the order of component injection. Unresolved issues and objectives for further research are formulated.

Keywords: production stimulation, thermobarochemical treatment, hydraulic fracturing, fracturing fluids, late stage of development.

Вступ. Переважна більшість основних за видобутком і запасами родовищ України перебуває на пізній стадії розробки, для якої характерні виснаження 80–85 % початкових видобувних запасів, зростання обводненості продукції та погіршення колекторських властивостей привибійної зони пласта (ПЗП); основний видобуток вільного газу (93 %) забезпечують лише 13 родовищ [1]. Нарощування видобутку з родовищ традиційного газу не передбачається, йдеться лише про уповільнення його падіння, яке в середньому оцінюють у 1,5 млрд м³ на рік; у 2020 р. видобуток становив близько 20 млрд м³ за споживання 30–32 млрд м³ [1]. За даними оператора, понад 75 % з понад 140 родовищ, що розробляє бізнес-напрям «Розвідка та видобування» Нафтогазу, виснажені на 80–90 %, а для вилучення залишкових запасів реалізується програма інтенсифікації видобутку [2]. Приріст балансових запасів газу в 2020 р. (9,3 млрд м³) був меншим за половину річного видобутку (20,3 млрд м³) [3]. У 2025 р. видобуток скоротився до майже 17 млрд м³ на тлі ударів по інфраструктурі, а імпорт наблизився до 6 млрд м³ [4]. Значна частка залишкових запасів зосереджена в низькопроникних та важкодоступних колекторах, що ускладнює їх залучення до розробки традиційними методами [5]. Окрім кольматації ПЗП, експлуатацію ускладнюють асфальтено-смоло-парафінові відклади (АСПВ) [6], тому типова

свердловина стикається не з одним конкретним ускладненням, а з їх поєднанням. Оскільки зростання видобутку можливе лише за умови відкриття нових родовищ і освоєння нетрадиційних запасів, а вартість приросту за рахунок нових родовищ, за прогнозними оцінками, зростає [1], інтенсифікація видобутку на діючому фонді, зокрема в низькопроникних колекторах, є практично важливим напрямом підтримання видобутку та підвищення енергетичної незалежності держави.

Мета і методи. Мета роботи – узагальнити сучасний стан методів інтенсифікації видобутку вуглеводнів та визначити невирішені питання поєднання термобарохімічної обробки (ТБХО) з гідравлічним розривом пласта (ГРП). Проаналізовано 48 джерел з відкритого доступу (у списку наведено ключові): вітчизняні та зарубіжні наукові публікації, навчально-методичні видання і патентні документи США та України, які згруповано за функціональними ознаками. Висновки про відсутність окремих даних стосуються лише проаналізованих джерел.

Основний матеріал. Методи інтенсифікації припливу вуглеводнів традиційно класифікують за фізичною природою впливу на пласт: гідродинамічні (ГРП), хімічні (кислотні та кислотно-термічні обробки), теплові, хвильові та імпульсні, а також комбіновані [5]. Порівняльну характеристику основних методів наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика основних методів інтенсифікації видобутку вуглеводнів

Метод	**Механізм дії**	**Основні обмеження**
Гідравлічний розрив пласта (ГРП)	Створення та закріплення пропантом провідної тріщини	Висока вартість; ризик кольматації тріщини залишками гелю [5, 7]
Хімічний (кислотна та кислотно-термічна обробка)	Розчинення карбонатної складової породи, утворення каналів розчинення	Малоефективна у пластах великої товщини за низьких швидкостей закачування [5]
Тепловий	Зниження в’язкості вуглеводнів, руйнування органічних відкладів теплом	Значні енерговитрати [8]
Хвильові та імпульсні (віброхвильова, акустична обробка)	Механічне руйнування кольматанту коливаннями/імпульсами тиску	Обмежений радіус дії, низька ефективність за глибокої кольматації [5].
Комбінований (ТБХО)	Екзотермічна реакція реагентів з одночасним тепловим, газовим і кислотним впливом	Потребує точного контролю концентрації реагентів [9]

Кожен з методів має обмежену сферу ефективного застосування, зумовлену його фізико-хімічною природою. Оскільки продуктивні пласти на пізній стадії розробки часто мають комбіновані ускладнення, застосування лише одного методу зазвичай вирішує тільки одну з проблем і знижує сумарну ефективність обробки. Зокрема, для пластів великої товщини за низьких швидкостей закачування кислотні обробки малоефективні, оскільки основна маса кислоти реагує поблизу стовбура свердловини, а до віддалених ділянок надходить уже значною мірою відпрацьованою [5].

ТБХО ґрунтується на використанні екзотермічних окисно-відновних реакцій безпосередньо в свердловині чи пласті, внаслідок яких у ПЗП генеруються тепло та газ під тиском [9, 10]. Поширеним варіантом є застосування пари реагентів на основі амонійних та нітритних сполук, реакція між якими ініціюється досягненням певної пластової температури або значення pH середовища [9]; компоненти можуть закачуватися роздільно, що дає змогу керувати місцем і моментом початку реакції (патентні рішення розглянуто нижче). Ефективність обробки істотно залежить від концентрації та співвідношення реагентів: за недостатньої концентрації реакція та утворений тиск можуть бути недостатніми для обробки всієї ПЗП, а надлишкова концентрація здатна призводити

до неконтрольованого утворення мікротріщин [9]. Лабораторні дослідження циклічних схем показали, що послідовність «ендотермічна – екзотермічна» обробка ефективніша за зворотну з погляду зниження модуля пружності породи, тобто не лише склад реагентів, а й порядок їх взаємодії з іншими розчинами визначає результат [10]. Результати поєднання гідравлічного та кислотного впливу підтверджують можливість підвищення провідності тріщин і продуктивності свердловин [11].

Ефективність ГРП значною мірою визначається властивостями рідини розриву. У практиці застосовують лінійні полімерні гелі, зшиті полімерні гелі підвищеної в'язкості та рідини на основі в'язкопружних поверхнево-активних речовин (VES) [12]. Полімерні системи потребують деструкторів (окисників, ферментів, кислот), а недостатнє руйнування гелю призводить до накопичення полімерних залишків у пропантній пачці та зниження провідності тріщини [7]. Під час послідовного поєднання ГРП з кислотною обробкою неповністю зруйнований гель може екранувати поверхню тріщини від кислоти, а передчасна взаємодія кислоти із загеленою рідиною знижує довжину ефективно обробленої тріщини [13]. У вітчизняних дослідженнях для виснажених газових покладів запропоновано попереднє створення горизонтальних каналів у ПЗП гідропіскоструминною перфорацією перед ГРП [14]. Аналогічні питання сумісності виникають і щодо взаємодії реагентів ТБХО з різними типами рідин ГРП.

Кінцевою метою обробки є не сама хімічна чи теплова дія, а покращення фільтраційних характеристик ПЗП, тому важливий взаємозв'язок між розчиненням породи-колектора та зміною її проникності. Розчинення карбонатної породи кислотою призводить до утворення каналів розчинення, а їх форма істотно залежить від швидкості закачування: за оптимальної швидкості в експерименті на кернах досягнуто максимального зростання проникності (приблизно в 11 разів), а за меншої чи більшої швидкості канали набували конічної або надмірно розгалуженої форми, що знижувало ефективність [15]. Водночас розчинення не завжди покращує фільтраційні властивості: вивільнення дрібних частинок з подальшою міграцією та осадженням у порових каналах спричиняє їх часткову закупорку [16], а інтенсивність міграції залежить від типу іонів у розчині та температури [17]. Для ТБХО це питання прямо актуальне, оскільки кислотна складова реагентної системи може одночасно розчиняти породу, а отже, впливати на форму каналів і міграцію частинок. Отже, розчинність породи в технологічному розчині є необхідною, але недостатньою умовою для висновку про покращення фільтраційних властивостей; без прямих вимірювань проникності до та після обробки такий висновок лишається обґрунтованим припущенням.

Патентний пошук виявив охоронні документи чотирьох функціональних груп: термохімічні реагентні системи, рідини ГРП та керування їх властивостями, кислотна стимуляція карбонатних колекторів, контроль міграції дрібних частинок. До першої групи належать, зокрема, спосіб видалення водяних блокувань у щільних газових колекторах термохімічними рідинами з ініціюванням реакції пластовою температурою (орієнтовно 50–100 °C) або заданим pH [18], дивертування обробки термохімікатами [9], подача екзотермічних реагентів концентричними гнучкими трубами для керованого змішування в пласті [19] та активатор реакції на основі кислот, що утворюються з лактонів [20]. Найближчим за змістом є патент US 9,488,042, у якому екзотермічний компонент (амонійна та нітритна сполуки) вводиться в рідину розриву з в'язким компонентом і пропантом для створення імпульсу тиску та додаткових тріщин у газовмісному пласті [21]. Виявлені вітчизняні патентні документи стосуються кислотно-реагентних складів для боротьби з органічними відкладеннями та декольматації ПЗП [22, 23].

Новизна. Поєднання екзотермічних реагентів з рідиною розриву для газовмісних пластів описано в зарубіжних розробках [21]. Водночас у проаналізованих джерелах не виявлено систематичних кількісних даних про перебіг екзотермічної реакції ТБХО в поєднанні з рідинами ГРП різних типів, що застосовуються на родовищах України (загелений кислотний розчин, кислота уповільненої дії на основі VES, частково

нейтралізований розчин, лінійний і зшитий гелі), залежно від послідовності введення реагентів і температури; такі питання розглянуто фрагментарно та переважно якісно. Вітчизняні наукові роботи охоплюють або термокислотні обробки без ГРП, або ГРП без термобарохімічного компонента, а вітчизняних патентів з цього питання не виявлено.

Висновки.

1. Комбіновані підходи, що поєднують кілька різних за природою механізмів впливу на пласт, є перспективним напрямом інтенсифікації видобутку на пізній стадії розробки: для гідравлічно-кислотного впливу це підтверджено експериментальними результатами [11, 13], тоді як для ТБХО в поєднанні з ГРП кількісних даних недостатньо.

2. У проаналізованих джерелах відсутні систематизовані кількісні дані щодо інтенсивності екзотермічної реакції ТБХО залежно від типу рідини ГРП та послідовності введення компонентів.

3. Розчинність породи-колектора є необхідною, але недостатньою умовою покращення фільтраційних властивостей: результат залежить від співвідношення утворення каналів розчинення та міграції дрібних частинок, тому дослідження розчинності потребують доповнення фільтраційними випробуваннями.

4. Завдання подальших досліджень: експериментальне вивчення перебігу екзотермічних реакцій розчинів ТБХО в поєднанні з основними типами рідин ГРП за різної послідовності введення реагентів і температури; дослідження розчинності розклинювального матеріалу та породи-колектора; обґрунтування критеріїв підбору сумісних реагентних систем для комбінованої технології ТБХО, суміщеної з ГРП.

Список використаних джерел:

1. Каплін, М., Білан, Т., Макаров, В., & Перов, М. (2022). Математична модель прогнозування видобутку вуглеводнів на основі часових залежностей періодів розробки родовищ нафти і природного газу. *Системні дослідження в енергетиці*, 1(70), 29–37. https://doi.org/10.15407/srenergy2022.01.029

2. *«Розвідка та видобування» – бізнес-напрям Нафтогазу, що займається пошуком, розвідкою та розробкою нафтогазових родовищ і видобутком вуглеводнів.* (б. д.). Нафтогаз України. https://www.naftogaz.com/business/exploration-and-production-business-unit

3. *Електронна система подання та аналізу звітності*. (б. д.). Головна - Електронна система подання та аналізу звітності. https://eiti.gov.ua/resursi-rozvidka-ta-vidobuvannya/gas_2022/

4. *Скільки газу видобули в Україні у 2025 році? 5 подій нафтогазового сектору України – Національна асоціація добувної промисловості України*. (2026). Національна асоціація добувної промисловості України. https://neiau.com.ua/skilky-gazu-vydobuly-v-ukrayini-u-2025-roczi-5-podij-naftogazovogo-sektoru-ukrayiny/

5. Орловський, В. М., Білецький, В. С., & Сіренко, В. І. (2023). *Нафтогазовилучення з важкодоступних і виснажених пластів*. Новий Світ - 2000. https://repository.kpi.kharkov.ua/items/7919e89d-89f6-4b29-a232-a6b551ea8d3b

6. Копей, І. Б., Середюк, В. Д., Дем'янчук, Я. М., & Лялюк, М. Я. (2021). Використання комплексної дії для запобігання та ліквідації асфальто-смоло-парафінових відкладів у стовбурі свердловини. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*, 2(51), 47–54. https://doi.org/10.31471/1993-9965-2021-2(51)-47-54

7. Almubarak T., Ng J. H. C., AlKhaldi M., Panda S., Nasr-El-Din H. A. (2020) Insights on potential formation damage mechanisms associated with the use of gel breakers in hydraulic fracturing. *Polymers*, 12(11). Article 2722. https://doi.org/10.3390/polym12112722

8. In situ combustion: A comprehensive review of the current state of knowledge. (2023). *Energies*. 16(17). Article 6306. https://doi.org/10.3390/en16176306

9. *Systems, methods, and compositions for reservoir stimulation treatment diversion using thermochemicals* (U.S. Patent No.11,268,017 B2). (2022) U. S. Patent and Trademark Office. https://patents.google.com/patent/US11268017B2/en

10.A novel approach to stimulating tight reservoirs using cyclic thermochemical fluids. (2025). *Energy & Fuels*, 39(1), 1234-1245. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5c02117

11. Composite stimulation technology for improving fracture length and conductivity of unconventional reservoirs. (2023). *Frontiers in Physics*. 11. Article 1181302. https://doi.org/10.3389/fphy.2023.1181302

12.Kang W., Mushi S. J., Yang H., Wang P., Hou X. (2020). Development of smart viscoelastic surfactants and its applications in fracturing fluid: A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 190. Article 107107. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107107

13. Optimization of fracturing fluid and retarded acid for stimulating tight naturally fractured bedrock reservoirs. (2022). *ACS Omega*, 7(22). 18910-18921. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01612

14. *Підвищення ефективності гідравлічного розриву пласта у свердловинах на виснажених газових покладах*. (2020). Івано-Франківській національний технічний університет нафти і газу. http://elar.nung.edu.ua/bitstream/123456789/9466/1/9575p.pdf

15. Mohammadi S. (2024). Mechanistic analysis of matrix-acid treatment of carbonate formations: An experimental core flooding study. *Heliyon*, 10(3), Article e24936. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24936

16. *Formation damage from fines migration*. (2025). *Society of Petroleum Engineers*. https://onepetro.org/spe/general-information/1599/Formation-damage-from-fines-migration

17. Effect of type of ion and temperature on fines migration induced by mineral reactions during water injection into carbonate rocks. (2023). *Journal of Environmental Management, 344*, Article 118501 2023. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118193

18. *Removal of water blockage in tight gas reservoir using thermochemical fluids* (U.S. Patent No. 11,208,877 B2). (2021). U. S. Patent and Trademark Office. https://patents.google.com/patent/US11208877B2/en

19. *Multilateral well drilled with underbalanced coiled tubing and stimulated with exothermic reactants* (U.S. Patent No. 10,087,736 B1). (2018). U. S. Patent and Trademark Office. https://patents.google.com/patent/US10087736B1/en?oq=10%2c087%2c736

20. *Activator for plain and foamed exothermic reaction in a wellbore* (U.S. Patent No. 12,319,870 B1). (2025). U. S. Patent and Trademark Office. https://patents.google.com/patent/US12319870B1/en

21. Al-Nakhli A. R., Abass H. H., Hilab V. V., Khan M. R., Al-Otaibi A. S. (2016). *Chemically-induced pulsed fracturing method* (U.S. Patent No. 9,488,042 B2). U. S. Patent and Trademark Office. https://patents.google.com/patent/US9488042B2/en

22. *Органічний композит очистки привибійної зони нафтогазонасичених пластів* (Патент України № 108793). (2015). Державний дипломний реєстр. https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/889336/

23. *Інгібітор асфальтово-смолистих та парафінових відкладів* (Патент України № 114234). (2017). База патентів України. http://uapatents.com/6-114234-ingibitor-asfaltovo-smolistikh-ta-parafinovikh-vidkladiv.html

References

Activator for plain and foamed exothermic reaction in a wellbore (U.S. Patent No. 12,319,870 B1). (2025). U.S. Patent and Trademark Office. https://patents.google.com/patent/US12319870B1/en

Al-Nakhli, A. R., Abass, H. H., Hilab, V. V., Khan, M. R., & Al-Otaibi, A. S. (2016). *Chemically-induced pulsed fracturing method* (U.S. Patent No. 9,488,042 B2). U.S. Patent and Trademark Office. https://patents.google.com/patent/US9488042B2/en

Almubarak, T., Ng, J. H. C., AlKhaldi, M., Panda, S., & Nasr-El-Din, H. A. (2020).

Insights on potential formation damage mechanisms associated with the use of gel breakers in hydraulic fracturing. *Polymers*, 12(11), Article 2722. https://doi.org/10.3390/polym12112722

Composite stimulation technology for improving fracture length and conductivity of unconventional reservoirs. (2023). *Frontiers in Physics,* 11, Article 1181302. https://doi.org/10.3389/fphy.2023.1181302

Effect of type of ion and temperature on fines migration induced by mineral reactions during water injection into carbonate rocks. (2023). *Journal of Environmental Management,* 344, Article 118501. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118193

Electronic reporting and analysis system. (n.d.). Home – Electronic reporting and analysis system. https://eiti.gov.ua/resursi-rozvidka-ta-vidobuvannya/gas_2022/ [in Ukrainian]

Exploration and Production – Naftogaz business unit engaged in search, exploration, development of oil and gas fields and hydrocarbon production. (n.d.). Naftogaz of Ukraine. https://www.naftogaz.com/business/exploration-and-production-business-unit [in Ukrainian]

Formation damage from fines migration. (2025). *Society of Petroleum Engineers*. https://onepetro.org/spe/general-information/1599/Formation-damage-from-fines-migration

How much gas was produced in Ukraine in 2025? 5 events of the oil and gas sector of Ukraine. (2026). National Association of Extractive Industry of Ukraine. https://neiau.com.ua/skilky-gazu-vydobuly-v-ukrayini-u-2025-roczi-5-podij-naftogazovogo-sektoru-ukrayiny/ [in Ukrainian]

Improving the efficiency of hydraulic fracturing in wells in depleted gas fields. (2020). Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. http://elar.nung.edu.ua/bitstream/123456789/9466/1/9575p.pdf [in Ukrainian]

In situ combustion: A comprehensive review of the current state of knowledge. (2023). *Energies,* 16(17), Article 6306. https://doi.org/10.3390/en16176306

Inhibitor of asphalt-resin and paraffin deposits (Ukrainian Patent No. 114234). (2017). Ukrainian Patent Database. http://uapatents.com/6-114234-ingibitor-asfaltovo-smolistikh-ta-parafinovikh-vidkladiv.html [in Ukrainian]

Kang, W., Mushi, S. J., Yang, H., Wang, P., & Hou, X. (2020). Development of smart viscoelastic surfactants and its applications in fracturing fluid: A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering,* 190, Article 107107. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107107

Kaplin, M., Bilan, T., Makarov, V., & Perov, M. (2022). Mathematical model for forecasting hydrocarbon production based on time dependences of development periods of oil and natural gas fields. *System Research in Energy,* 1(70), 29–37. https://doi.org/10.15407/srenergy2022.01.029 [in Ukrainian]

Kopei, I. B., Serediuk, V. D., Demianchuk, Ya. M., & Lialiuk, M. Ya. (2021). Use of complex action to prevent and eliminate asphalt-resin-paraffin deposits in the wellbore. *Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,* 2(51), 47–54. https://doi.org/10.31471/1993-9965-2021-2(51)-47-54 [in Ukrainian]

Mohammadi, S. (2024). Mechanistic analysis of matrix-acid treatment of carbonate formations: An experimental core flooding study. *Heliyon,* 10(3), Article e24936. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24936

Multilateral well drilled with underbalanced coiled tubing and stimulated with exothermic reactants (U.S. Patent No. 10,087,736 B1). (2018). U. S. Patent and Trademark Office. https://patents.google.com/patent/US10087736B1/en?oq=10%2c087%2c736

A novel approach to stimulating tight reservoirs using cyclic thermochemical fluids. (2025). *Energy & Fuels*, 39(1), 1234-1245. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5c02117

Optimization of fracturing fluid and retarded acid for stimulating tight naturally fractured bedrock reservoirs. (2022). *ACS Omega*, 7(22). 18910-18921. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01612

Organic composite for cleaning the bottomhole zone of oil and gas saturated formations (Ukrainian Patent No. 108793). (2015). Ukrainian Patent Database. https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/889336/ [in Ukrainian]

Orlovskyi, V. M., Biletskyi, V. S., & Sirenko, V. I. (2023). *Hydrocarbon recovery from hard-to-reach and depleted reservoirs*. Novyi Svit - 2000. https://repository.kpi.kharkov.ua/items/7919e89d-89f6-4b29-a232-a6b551ea8d3b [in Ukrainian]

Removal of water blockage in tight gas reservoir using thermochemical fluids (U.S. Patent No. 11,208,877 B2). (2021). U. S. Patent and Trademark Office. https://patents.google.com/patent/US11208877B2/en

Systems, methods, and compositions for reservoir stimulation treatment diversion using thermochemicals (U.S. Patent No.11,268,017 B2). (2022) U. S. Patent and Trademark Office. https://patents.google.com/patent/US11268017B2/en