

М. О. Харченко, канд. техн. наук, доцент, Ю. Л. Винников, д-р техн. наук, професор,
О. В. Матяш, канд. техн. наук, доцент, М. О. Рибалко, канд. техн. наук, ст. викладач

ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ СВЕРДЛОВИН В КАРБОНАТНИХ МАЛОПРОНИКНИХ ПЛАСТАХ

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Ключові слова: похилоскероване буріння, технологія Fishbone буріння, багатостовбурна і багатовибійна свердловина, компоновка низу бурильної колони (КНБК), експлуатаційний хвостовик, привибійна зона свердловини (ПЗС), малопроникні карбонатні колектори, кислотна ерозія, механічна ерозія, струминна ерозія, хімічна ерозія, гірські породи, продуктивність.

Вступ. Сучасні технології буріння свердловин дозволяють їх спорудження в різноманітних гірничо-геологічних умовах з різною траєкторією стовбурів, зокрема, з похилоскерованими та горизонтальними ділянками. При цьому все частіше виконують проекти із багатостовбурною конструкцією (multilateral), а інколи навіть додатково і з багатовибійною конструкцією (multi-lateral completion with multiple ends). Принципова різниця між багатостовбурною та багатовибійною свердловинами в тому, що для багатостовбурної свердловини характерна наявність основного і одного або декілька повноцінних бічних стовбурів (laterals), кожен із яких може працювати як окрема свердловина. Для багатовибійної свердловини характерно наявність основного материнського стовбуру, з якого в межах продуктивного горизонту споруджуються додаткові розгалуження, тобто утворюються кілька цільових точок дренування в межах одного пласта. Принципові схеми свердловин із багатостовбурними і багатовибійними конструкціями наведено на рис. 1.

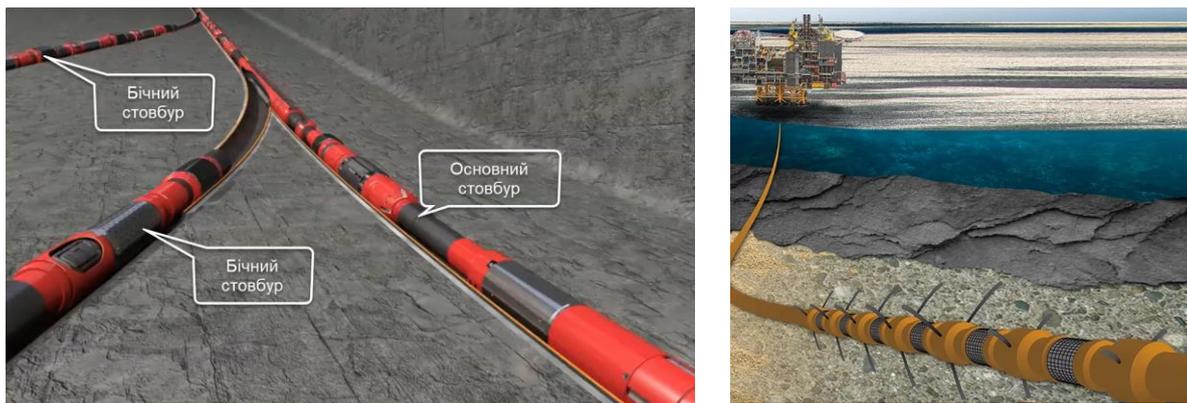


Рисунок 1 – Принципові схеми багатостовбурної (ліворуч) і багатовибійної (праворуч) конструкції свердловини

Звичайно, що спорудження багатостовбурних свердловин є складною технічною задачею і коштує дорого та може мати сенс лише для великодебітних свердловин, в т.ч. для морських свердловин, для експлуатації яких додатково потрібно використовувати

морські платформи. Для умов видобутку природного газу в гірничо-геологічних умовах України такі свердловини в більшості випадків є нерентабельними.

За умови розробки малопроникних колекторів і вилучення важковидобувних вуглеводнів, особливо на значних глибинах, що характерно для гірничо-геологічних умов Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ), останнім часом гарно себе зарекомендувала технологія гідравлічного розриву пласта (ГРП). Альтернативою цього методу є спорудження багатовибійних свердловин, де бічні відгалудження від основного стовбуру будуть замінювати роль тріщин, які утворюються після ГРП. При цьому мінімізуються ризики неконтрольованого розриву пласта, оскільки буріння бічних відгалуджень від основного стовбуру є більш контрольованим процесом. Таким чином, технологія спорудження багатовибійних свердловин дає можливість суттєво підвищити відсоток вилучення вуглеводнів із продуктивного пласта (навіть важковидобувних) і розробляти родовища зі складною будовою.

На сьогодні вже апробовано конструкції багатовибійних свердловин типу Fishbone [1–7], принципова схема якої наведена на рис. 1. Така технологія застосовується для підвищення продуктивності свердловин за рахунок збільшення площі контакту між привибійною зоною та продуктивним пластом. Практика спорудження свердловин типу Fishbone накопичила відповідний досвід для різних гірничо-геологічних умов. Наприклад, є дані апробації цієї технології на глибинах 5200 м. Довжина відгалуджень коливається в межах від 10 до 300 м залежно від геолого-технічних умов і технологічних задач розробки відповідного продуктивного пласта. Ці відгалудження можуть бути влаштовані різної кількості в різних напрямках від основного стовбуру свердловини.

Наприклад, у [1] було запропоновано інтегрований аналітичний підхід до моделювання тиску, режимів фільтрації та рівню (індексу) продуктивності для горизонтальних Fishbone свердловин, у яких розташовані відгалудження від основного стовбуру передбачається під різними кутами з різними довжинами з урахуванням траєкторій проникності й анізотропії пласта. Зокрема, формулюються нові моделі для очікуваних режимів течії, щоб обрати «сприятливу конфігурацію та розподіл» відгалуджень у довільних анізотропних середовищах. Запропонований підхід дає методику підбору конфігурації відгалуджень для збільшення продуктивності свердловини, що є надзвичайно корисним на етапі передпроектного техніко-економічного обґрунтування та скринінгу варіантів (особливо за обмежень на кількість і довжину відгалуджень). Також обґрунтовано доцільність таких конструкцій свердловин для низько- та середньопроникних пластів, де звичайний горизонтальний стовбур не забезпечує достатню продуктивність свердловин. При цьому слід зазначити, що реальні складно-тріщинуваті карбонати потребують верифікації на геомеханічних моделях у спеціалізованих програмних продуктах, наприклад ECLIPSE.

Також відомий досвід реалізації свердловини із Fishbone технологією, яка дала в 3,6 рази вищий початковий дебіт порівняно зі стандартною свердловиною. Оптимальні параметри гілок були: довжина 280 м, кут 15° – 25° , кількість гілок 3 (при умові заданої геометрії). При збільшенні довжини гілок до 400 м чи кількості більше 3 ефект зростає малими темпами або знижується через інтерференцію. Впровадження технології Fishbone дозволило значно збільшити площу контакту свердловин із пластом в умовах тонкого продуктивного горизонту, що є її ключовою перевагою [6].

Авторами [10] представлено технологію, яка вперше дозволила одночасно споруджувати 72 бічні канали (laterals) («гілки») з одного стовбура методом струминного прорізання (jetting) із системою контролю шламу у пласті м'якої крейди.

Для спорудження відгалужень у щільних піщаниках [5] добре себе зарекомендувала технологія Fishbone Drilling Dreamliner. При спусканні експлуатаційного фільтр-хвостовика в попередньо пробурений інтервал продуктивної частини свердловини, який не передбачається цементувати, його додатково дооснащують трубками (міні-бурильними колонами), які через спеціальні отвори у хвостовику будуть бурити відгалудження. Для цього застосовують невеликі турбіни для обертання бурових доліт, які розміщені на кінцях титанових голок Dreamliner (рис. 2) для скерованого проникнення в колектор. Такі титанові голки втискаються у пласт, а бурове долото (міні бурильна колона) при обертанні руйнує гірську породу. Принцип дії невеликих турбін аналогічний системі гвинтових вибійних двигунів – привід відбувається гідравлічним шляхом за рахунок циркуляції через міні бурильну колону бурового розчину. Шлам за рахунок циркуляції бурового розчину транспортується на поверхню як і при тридаційному бурінні свердловини. Діаметри влаштованих таким чином відгалуджень коливаються в діапазоні 10–20 мм.

Для створення відгалужень у карбонатних колекторах [4, 8–10] апробовано технологію струминної ерозії різними кислотами Fishbone Jetting (рис. 3). Для цього у кінці кожної голки є струменеве сопло, яке забезпечує циркуляцію кислоти, котра при взаємодії з карбонатами їх розчиняє і додатково руйнує своїм потоком (зазвичай тиск подачі більше 20 МПа) за рахунок механічної та хімічної ерозії гірської породи.

Фото бурильного інструменту за даними [10] наведено на рис. 4. За рахунок такої технології відпадає необхідність у циркуляції рідини аж до верху свердловини для транспортування шламу. На фото рис. 5 зображено зразки гірської породи із карбонатних кернів до та після випробувань кислотною ін'єкцією за даними [10], а на рис. 6 – фото обладнання для влаштування відгалуджень (гілок) після його використання в промислових умовах за даними [10].

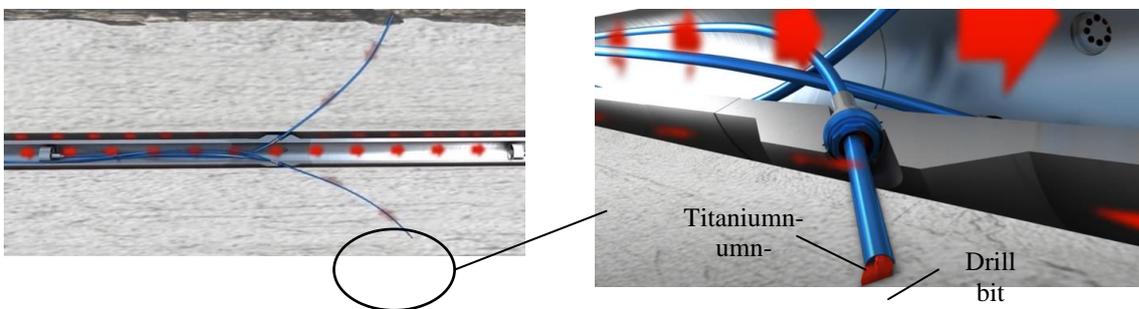


Рисунок 2 – Технологія Fishbone Drilling Dreamliner (Fishbones AS)



Рисунок 3 – Технологія Fishbone Jetting (Fishbones AS)

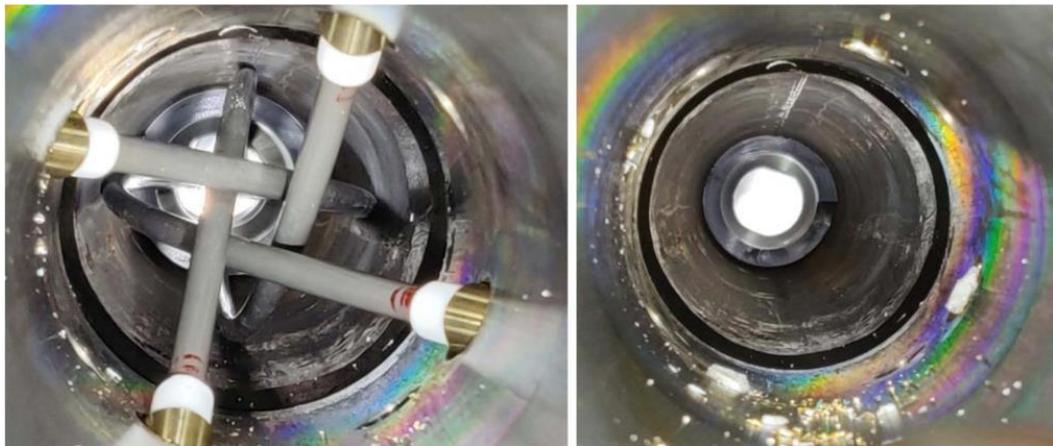


Рисунок 4 – Фото бурильного інструменту для Fishbone Jetting Technology: зліва – до початку влаштування відгалужень; праворуч – після завершення всіх бурових технологічних операцій [10]

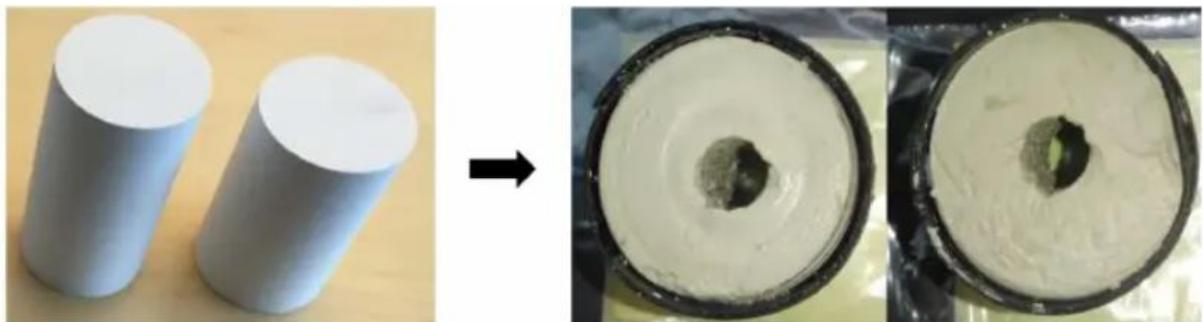


Рисунок 5 – Фото зразків гірської породи (карбонатні керни) до та після випробувань кислотною ін'єкцією за даними [10]

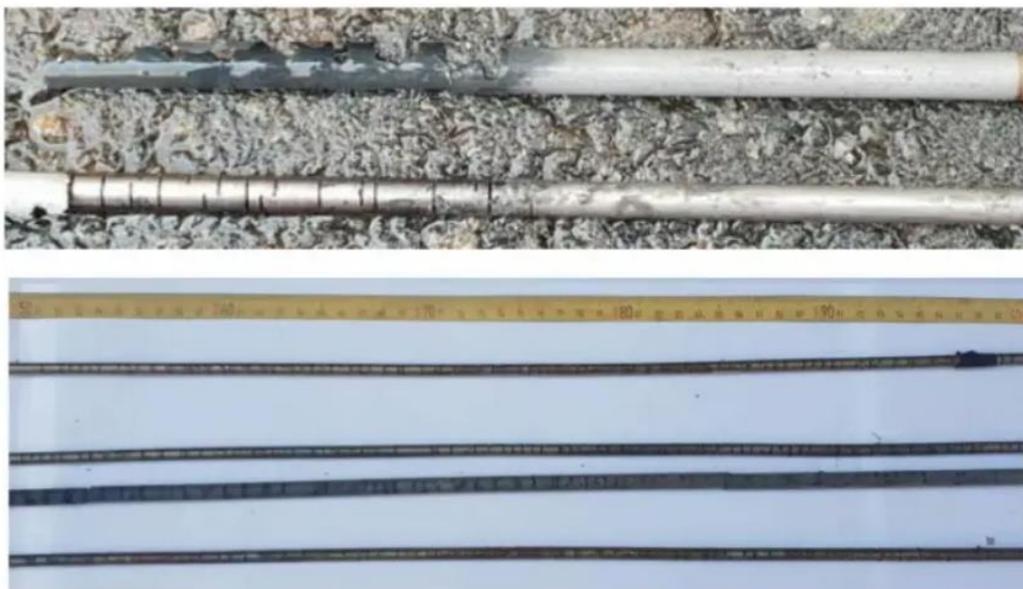


Рисунок 6 – Фото обладнання для влаштування відгалуджень (гілок) після його використання в промислових умовах за даними [10]

У [7] автори проаналізували вплив різних параметрів на те, як точно і ефективно інструмент входить із гілки назад у основний стовбур: кут відгалуження гілки, довжина гілки до “re-entry” точки (повторне входження бурового інструменту в головний стовбур під час буріння гілок свердловин типу “fishbone”), радіус кривизни, бурова швидкість, геометрія проходу від гілки до стовбура. Встановлено, що кут відгалуження гілки є критичним фактором: занадто великий кут (наприклад більше $\sim 30^\circ$) суттєво ускладнює re-entry в основний стовбур через більшу кривизну і більший радіус входу.

Обґрунтування проблеми. Свердловин типу Fishbone мають певну популярність, але в Україні цю технологію ще не застосовували, а отже актуальним є задача її впровадження з врахуванням умов місцевих родовищ. Потужні нафтогазонасичені карбонатні відклади ДДЗ, що зосереджені переважно у візейських і турнейських відкладах нижнього карбону та у верхньодевонських відкладах, мають значне площинне поширення та потужності до декількох сотень метрів [12]. Тому дані поклади мають великі перспективи щодо їх освоєння. Отже, необхідне обґрунтування ефективних конструкцій свердловин для максимального вилучення вуглеводнів із подібних відкладів.

Аналіз світового досвіду розробки нетрадиційних ресурсів вуглеводнів показує, що карбонатні, карбонатно-глинисті й інші колектори з високою карбонатністю успішно освоюються за допомогою системи горизонтальних свердловин і гідророзривів пласта [13].

При цьому є чимало складностей до розробки пластів з суттєвою карбонатністю та високими пластовими температурами, зі значним ступенем фаціальної неоднорідності і великою кількістю тектонічних порушень, із високими ризиками прориву заводненої зони до свердловини через неконтрольоване тріщиноутворення при ГРП тощо. Цих проблем можна уникнути при використанні свердловин типу Fishbone [6], що дозволяє контролювано створити потрібну кількість і довжину відгалужень у заданому напрямку від материнського стовбура свердловини. При цьому застосовують механічну та хімічну ерозію кислотами для розбурювання карбонатних колекторів замість бурових доліт при створенні відгалужень, що суттєво знижує ймовірність виникнення ускладнень і аварій, викликаних порушенням роботи й прихопленням бурового інструменту, а відповідно зменшує вартість робіт та ризики ускладнень і аварій.

Додатково слід відзначити, що спорудження відгалужень без промивання буровими технологічними рідинами має певну технологічну перевагу. Це викликано тим, що сучасні бурові розчини являють собою цілі комплекси з великою кількістю складних хімічних сполук. Висока хімічна активність карбонатних гірських порід часто призводить до значних змін властивостей порід унаслідок буріння, освоєння, перфорації свердловин при реакції з хімічними реагентами технологічних рідин. Особливу небезпеку несе буріння свердловин за умови значної депресії на пласт, оскільки в такому разі фільтрат бурового розчину проникає у продуктивний горизонт на значну глибину. Фільтрат здатний утворювати у пласті складні сполуки та частково чи повністю блокувати рух флюїдів у привибійній зоні свердловини. Щоб ліквідувати негативний вплив фільтрату бурових технологічних рідин слід проводити очистку привибійної зони свердловини, що ускладнює та збільшує вартість спорудження свердловини.

Одним з найбільших недоліків технології влаштування свердловин типу Fishbone є її відносно висока вартість, а тому як альтернативу застосовують технологію ГРП. Цей спосіб не завжди є технологічно доцільним і безпечним, наприклад, через близьке розміщення водоносного горизонту чи якихось технічних обмежень. Тому з метою підвищення технологічної ефективності освоєння високотемпературних колек-

торів з високою карбонатністю на глибинах до 5000 м та зменшення технічних і екологічних ризиків доцільно розробити рішення, які дозволять мінізувати вартість спорудження багатовибійних свердловин, зокрема відгалужень від материнського стовбуру й підвищать ефективність їх взаємодії з продуктивним пластом.

Мета досліджень – проаналізувати сучасні технологічні рішення задля підвищення продуктивності свердловин в карбонатних малопроникних пластах шляхом застосування технології буріння свердловин типу Fishbone.

Основна ідея роботи. Для зменшення вартості створення свердловин типу Fishbone доцільно удосконалити технологію струминної (механічної) та кислотної (хімічної) ерозії карбонатних колекторів шляхом підбору ефективного складу кислотних розчинів. Для підвищення ефективності взаємодії кожного відгалуження від материнського стовбуру з продуктивним пластом пропонується забезпечити глибоке проникнення в привибійні зони відгалужень розробленого авторами кислотного розчину. Після формування бічного відгалуження за допомогою того самого комплекту обладнання, що використовують для струминної ерозії, подається кислотний розчин низької в'язкості на основі повільнодіючих кислот. Тиски й об'єми закачування повинні відповідати гірничо-геологічним умовам та необхідній глибині формування привибійної зони з покращеними фільтраційно-ємнісними властивостями навколо відгалуження Fishbone (залежить від кількості відгалужень, насичуючого флюїду, міцнісних характеристик і т. ін.). Процес закачування залежно від властивостей продуктивного пласта і може тривати від кількох десятків хвилин до кількох (іноді до 30-40) годин. Після чого розчин витримують у пласті на розрахунковий час для реагування (залежно від карбонатності та структури породи, фільтраційних властивостей та ін.) та проводять освоєння свердловини для очищення від продуктів реакції.

При цьому проникність привибійної зони кожного відгалуження суттєво збільшиться (існуючі тріщини розширяться й утворяться додаткові вторинні глибокопроникні канали), і відповідно загальна продуктивність багатовибійної свердловини типу Fishbone також значно збільшиться. Принципова схема цього процесу подана на Fig. 7. Екологічна безпечність цієї технології досягається використанням кислотних розчинів на основі органічних кислот.

Гірські породи з високою карбонатністю розчиняються великою кількістю типів і видів кислот [14–16], але вибір ефективної технології для механічної і хімічної ерозії та наступної обробки привибійної зони відгалуження для підвищення проникності гірської породи в цих зонах залежить від цілого ряду факторів. З практики інтенсифікації видобування відомо, що однією з головних проблем для гірських порід на значних глибинах є недостатньо глибоке проникнення кислотних розчинів внаслідок малої проникності породи [17–19]. І тоді закачані у свердловину кислотні системи реагують із породою, не досягнувши достатньої для покращення фільтраційних властивостей глибини, в привибійній зоні.

Високі пластові температури [20] суттєво пришвидшують реакцію закачаних кислотних систем з гірською породою, і відповідно відсутнє необхідне глибоке проникнення у пласт. Тому не відбувається утворення розгалуженої сітки каналів. Таким чином, для досягнення очікуваного ефекту щодо збільшення проникності привибійної зони потрібно, щоб кислотні системи мали певну хімічну стійкість протягом часу проникнення в гірську породу, а потім при максимальному проникненні всупали в реакцію та розчиняли карбонатні колектори.

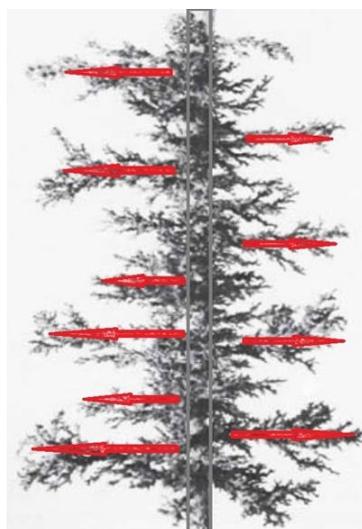
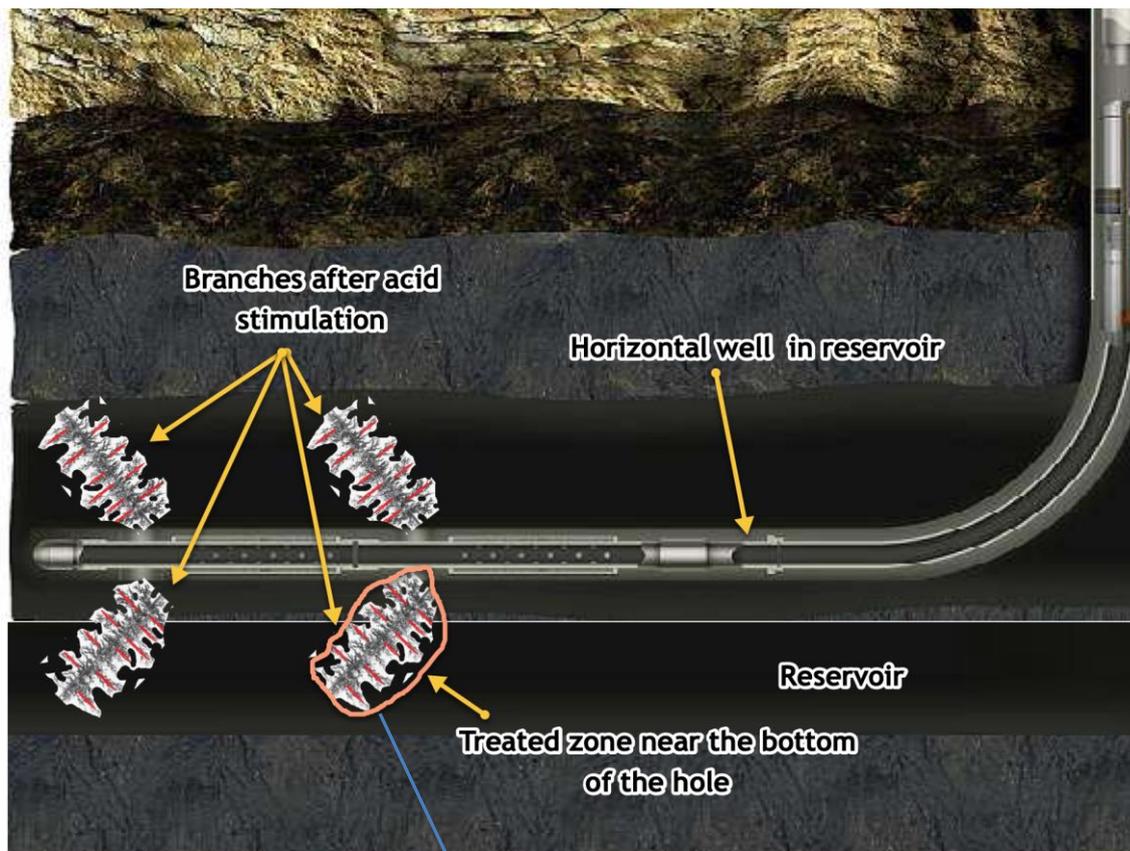


Рисунок 7 – Фрагмент свердловини типу Fishbone і відгалуження від її материнського стовбуру після обробки привибійної зони пласта високопроникаючими кислотними розчинами

Тому для забезпечення якісного процесу хімічної (кислотної) ерозії для спорудження відгалуження від материнського стовбуру свердловини типу Fishbone потрібно використовувати кислотні розчини із максимальною швидкістю реакції, а для посліду-ючого проникнення кислотних систем у привибійну зону в межах утвореного відгалу-ження за умов високотемпературних карбонатних колекторів кислотні розчини при

пластових умовах повинні володіти наступними властивостями: незначна в'язкість і коефіцієнт поверхневого натягу; низька швидкість реакції; хімічні властивості мають забезпечувати відсутність нерозчинних осадів у процесі реакцій з флюїдами та породою, тощо.

Основні матеріали досліджень. За результатами патентного пошуку та аналізу відповідних публікацій за цією тематикою встановлено, що спорудження свердловин в основному відбувається за такою технологією: після проходження основного стовбура свердловини в експлуатаційну обсадну колону спускають клиновий відхиляючий інструмент whipstock і через його вікно здійснюють буріння відгалуження (sidetracking). Однак такий підхід неминуче зменшує діаметр основного стовбура, а оскільки основний стовбур є горизонтальною свердловиною, установка клинового інструмента є технічно складною, що знижує ефективність буріння та збільшує тривалість робіт із завершення свердловини.

На рис. 8 наведено технологію спорудження fishbone свердловини за патентом CN101397888B, що подано компанією CNPC Great Wall Drilling Co. Суть технології наступна: після закінчення буріння основного стовбура спускають експлуатаційний хвостовик (borehole hanger) та виконують завершення лайнером (liner completion). Далі по черзі спускають відхиляючі клини (window whipstock) та інструменти для створення бічних отворів у обсадній колоні (windowing), через які здійснюють проходку кожного бокового стовбура. Після буріння кожного відгалуження встановлюють підвіску та обсадну колону для завершення. Наприкінці система герметизується за допомогою внутрішнього пакера (поз. 7 на рис. 8) з підвішеним хвостовиком, який закріплений на експлуатаційній обсадній колоні (поз. 8 на рис. 8). При цьому після завершення бокового стовбура F1 (поз. 2 на рис. 8) у материнський стовбур (поз. 1 на рис. 8) спускають та монтують той самий тип підвіски і хвостовик (поз. 3 на рис. 8). Хвостовик свердловини є фільтраційним або перфорованим, що забезпечує гідравлічний зв'язок з основним стовбуром. Бокові стовбури F2, F3 (поз. 5 і 6 на рис. 8) тощо буряться та завершуються за тією ж послідовністю.

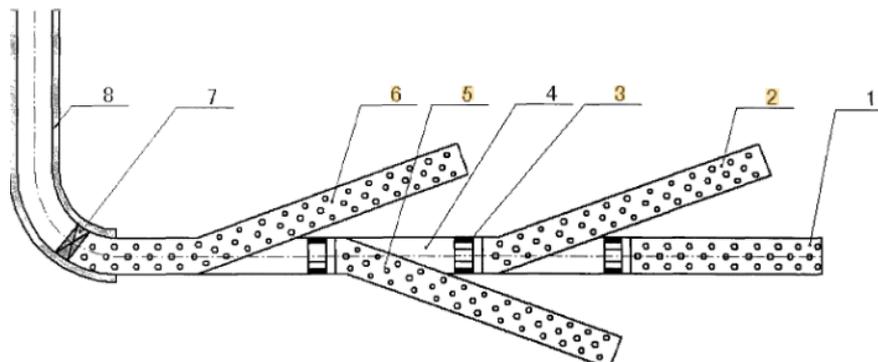


Рисунок 8 – Технологія спорудження свердловини типу Fishbone за патентом CN101397888B:

- 1 – основний материнський стовбур свердловини; 2, 5, 6 – відгалуження (гілка) F1, F2, F3 відповідно; 3 – механічний елемент кріплення, який служить для підвішування або закріплення обсадної колони, лайнера, або іншого обладнання всередині стовбура свердловини (borehole) на заданій глибині; 4 – whipstock-відхилювач у «вікні» свердловини; 7 – пакер; 8 – експлуатаційна обсадна колона свердловини

Механічне влаштування гілок через «вікно» (whipstock) – класичний варіант

fishbone зі спорудженням кожної гілки буровою колоною або КНБК на колоні гнучких труб. Такий підхід дає максимально контрольовану траєкторію, можливість ставити лайнери чи екрани відразу після буріння.

У разі використання кислотної ерозії у відповідних гірничо-геологічних умовах кислота не лише прорізає канал, а й розчиняє навколишній карбонат, формуючи радіальні «wormholes» на глибину до 0,5...1 м від осі каналу. У тестових свердловинах після acid-jetting спостерігали підвищення дебіту в 2...3 рази при мінімальному скінефекті. Для забезпечення точного кута виходу гілок використовується система мультипортового адаптера з попереднім орієнтуванням по азимуту. Позиціонування підтверджується інклінометричними даними та аналізом тискових піків під час jetting.

Середній ефективний час на створення однієї гілки 10...15 хв., при збільшенні цього часу ефективністю суттєво падає.

На рис. 9 наведено варіанти КНБК, для буріння струменем під високим тиском за даними публікації [11]. Зокрема, на рис. 10 наведено КНБК для перфорації обсадної труби (на рисунку ліворуч) і радіального струменевого буріння (на рисунку праворуч). В усіх цих варіантах спуск КНБК для влаштування бічних відгалуджень передбачено за допомогою колтюбінгового обладнання на гнучких насосно-компресорних трубах.

В таблиці 1 зведено узагальнені дані щодо етапів спорудження бічних відгалуджень (гілок) при використанні буріння за технологією Fishbone Jetting.

В таблиці 2 зведено основні проблеми і шляхи їх вирішення при використанні буріння за технологією Fishbone Jetting.

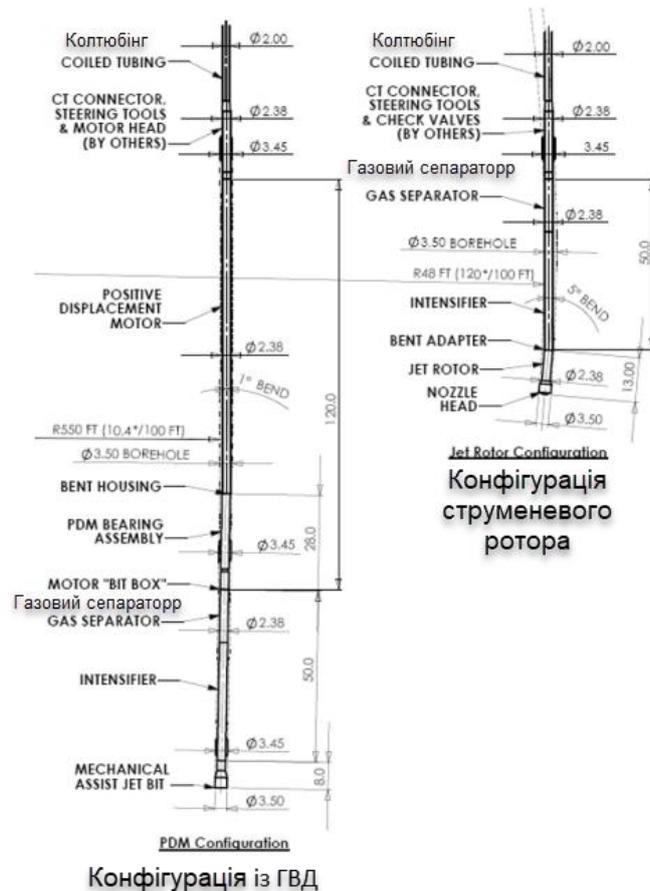


Рисунок 9 – Варіанти КНБК для буріння струменем під високим тиском [11]

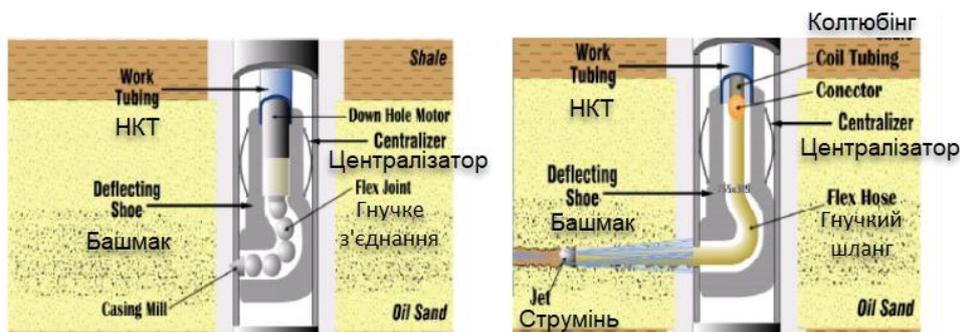


Рисунок 10 – КНБК для перфорації обсадної труби (ліворуч) і радіального струменевого буріння (праворуч) [11]

Таблиця 1 – Узагальнені дані щодо етапів спорудження бічних відгалуджень (гілок) при використанні буріння за технологією Fishbone Jetting

Етап	Опис дій	Примітки
1. Підготовка	Перфорація обсадної колони в інтервалі пласта, перевірка циркуляції.	Визначають напрямок гілок (звичайно 4...8 за один спуск).
2. Спуск Fishbone Sub	Спускається інструмент із набором голок (jetting needles).	Голки попередньо орієнтовані на задані кути.
3. Jetting	Подавання соляної кислоти HCl або абразиву для прорізання каналів у гірській породі.	Тиск подачі 15...25 МПа, час 5...15 хв на гілку.
4. Промивка / стабілізація	Промивання каналу; у деяких випадках додаткова кислотизація для розчинення дрібних уламків.	У карбонатах соляна кислота HCl створює «wormhole» навколо радіального каналу.
5. Перехід до наступного рівня	Інструмент переміщується вище або нижче в інший інтервал, повторення операції.	На одну свердловину доцільно передбачати 24...72 гілки (залежно від товщини пласта).

Таблиця 2 – Основні проблеми і шляхи їх вирішення при спорудженні бічних відгалуджень (гілок) при використанні буріння за технологією Fishbone Jetting

Проблема	Рішення
Винос шламу й розчинених частинок гірської породи при виконанні операцій jetting	Доцільно встановлення спеціального обладнання для контролю виносу із фільтрацією до 20 мкм.
Зминання або обвалення гілок у разі наявності слабких карбонатних порід	Доцільно використовувати обладнання контролю тиску та виконувати роботи із короткою тривалістю jetting, в т.ч. використовувати спеціальні склади кислот для стабілізації стійкості гірських порід.
Неточність орієнтації отворів у обсадній колоні (експлуатаційному хвостовику)	Доцільно використовувати направляючі портові муфти з маркуванням азимуту.
Контроль герметичності після завершення робіт	Доцільно використовувати пакери та обладнання контролю тиску для кожного інтервалу після обробкою гірських порід кислотою.

Для більш ефективного спорудження гілок, тобто для збільшення проникності ПЗП навколо них для глибоких свердловин в умовах високотемпературних пластах із високою карбонатністю слід після завершення операцій fishbone-jetting закачувати у ці тріщини кислотну систему на основі метилацетату. Кислоти з таким складом через невисоку в'язкість і низький поверхневий натяг краще проникають у низькопроникні карбонатні колектори та за рахунок сповільненої реакції мають достатньо активної кислоти для розчинення породи на значній відстані (декільтка метрів) від стовбуру бічного відгалудження основної свердловини. Це дозволить додатково збільшити продуктивність свердловини [14, 20, 21]. Зокрема, за результатами лабораторних досліджень на реальних кернах в пластових умовах проникність зразків після обробки збільшилась у межах 6,13...18,39 мД. Тобто середнє зростання проникності склало 3,19 рази. Це підтверджує, що механізм сповільненої кінетики та генерації кислоти в пластових умовах (за рахунок гідролізу метилацетату) створить стійкі дренаючі канали та суттєво покращить фільтраційні характеристики на значній відстані від ПЗП.

На рис. 11 наведено схему механізму дії кислотної системи на основі метилацетату в карбонатному колекторі.



Рисунок 11 – Схема механізму дії кислотної системи на основі метилацетату в карбонатному колекторі

При спорудженні свердловин в гірничо-геологічних умовах ДДЗ слід розглянути гідравлічні особливості jetting-технології на великих глибинах (більше 3500 м). При гідростатичних тисках в свердловині більше 35 МПа зростає фонові протидія струменю. Це призводить до втрати ефективної різниці тиску. Для досягнення потрібної швидкості струменя (120...180 м/с) необхідно підняти робочий тиск насосів до 55...65 МПа. Через значну довжину НКТ відбуваються суттєві втрати тиску (до 5...8 МПа). Це вимагає використання високоміцних труб з внутрішнім діаметром більше 32 мм, зменшення вигинів, мінімізацію секційних з'єднань. Для створення необхідного тиску на вибої слід застосовувати спеціальні технології, що будуть створювати додатковий тиск на таких глибинах (Boost-підживлення або двоступеневе буріння).

Крім того слід враховувати геомеханічні та геотермальні фактори. Висока температура (120...160 °C): знижує в'язкість кислоти, що буде наслідком прискорення реакції з карбонатом (коротший час дії); змінює реології бурової рідини і як наслідок збільшує його турбулентність; потребують додаткової корозійної стійкості титанові гілки та ущільнення. Підвищений гірський тиск призводить схильність пласта до пла-

стичного деформування або руйнування відгалуджень при jetting; доцільно вводити стабілізуючу кислоту з осадом CaF_2 або SiO_2 для формування тонкої кірки.

В таблиці 3 зведено параметри для проектування буріння за технологією fishbone-jetting для різних глибин свердловини, а також прогнозні дані щодо можливих ризиків та очікуваного приросту продуктивності свердловини.

Таблиця 3 – Параметри для проектування буріння за технологією fishbone-jetting для різних глибин свердловини для гірських порід із високою карбонатністю

Параметр	Глибина свердловини		
	~2000 м	~3500 м	~5000 м
Втрати тиску у НКТ, МПа	2...4	5...8	8...12
Рекомендована довжина однієї гілки, м	8...15	6...8	4...6
Кількість гілок на інтервал пласта	30...60	20...40	16...30
Крок між гілками, м	3...5	4...6	5...7
Тип рідини для jetting	HCl 15...28 % + інгібітор	Ретардовані (наприклад, Emulsified/VDA від компанії SLB) HCl	Ретардовані високо-температурні (наприклад, E-acid/VDA від компанії SLB)
Додатки до рідини	ПАР, корозійні інгібітори	ПАР, органічні розчинники, корозійні інгібітори	ПАР, нанодобавки для сповільнення реакції
Орієнтація гілок і пріоритет напрямку їх буріння	15...30°; в сторону максимальної проникності k_{max}	15...25°; в сторону максимальної проникності k_{max}	10...20°; для мінімізації напружень у обсадній колоні
Контроль орієнтації	MWD/магнітний інклінометр	Гіроскопічні системи	Гіроскоп + оптоволокно (за потреби)
Моніторинг притоку	+/-	+/-	+
Контроль за вимиванням	Фільтрація $\geq 20..30$ мкм	Посилена фільтрація 10...20 мкм	5...10 мкм, високо-продуктивні шламоуловлювачі
Ризики	Втрата циркуляції, корозія	Руйнування каналів, перегрів обладнання, корозія	Розрив обсадної колони, корозія, заклинювання
Очікуваний приріст продуктивності свердловини	~ $\times 2...3$	~ $\times 1.5...2$	~ $\times 1.3...1.8$

Як наслідок на глибинах більше 3500 м раціональна довжина радіальних каналів має бути 6...8 м, бо при більшій їх довжині втрати енергії струменя стає дуже критич-

ною. Також є сенс зменшити кількість гілок (максимум 20...40 каналів) зі збільшенням інтервалом між ними (4...6 м), щоб мінімізувати взаємне ослаблення цементного кільця кріплення експлуатаційного хвостовика. Це переводить fishbone-технологію з відносно недорогого методу інтенсифікації («low-cost stimulation») у високотехнологічну інженерну операцію, близьку до міні-гідророзриву.

Висновки. Технологія буріння бічних відгалужень від материнського стовбура свердловини типу Fishbone шляхом струминної (механічної) та хімічної (кислотної) ерозії є ефективним методом, який мінімізує ризики виникнення аварійних ситуацій з бурильним інструментом, дає можливість уникнути забруднення привибійної зони фільтратом бурових промивальних рідин, зменшує вартість і підвищує екологічність процесу. Для ефективного спорудження бічних відгалужень шляхом струминної (механічної) та хімічної (кислотної) ерозії найкраще підходять кислоти на основі соляної кислоти, оскільки у них найвища швидкість реакції, що підтверджено дослідним шляхом на кернах гірської породи з глибин 4892...4896 м.

Теоретично доведено, що продуктивність свердловин влаштованих по технології fishbone-jetting у порівнянні із звичайними свердловинами з горизонтальною ділянкою в межах продуктивного горизонту, складеного гірськими породами із високою карбонатністю, залежно від гірничо-геологічних умов збільшиться від 1,3 до 3 разів. При цьому для підвищення ефективності після завершення операцій fishbone-jetting доцільно на додатково обробити бічні відгалуження (гілки) розчинами на основі ацетатів оцтової кислоти.

Позитивний ефект від буріння за Fishbone технологією для глибоких свердловин сильно залежить від пластових умов, геометрії і фізики пласта та часто потребує комбінування з кислотним ГРП або «розумними» завершеннями (smart well або artificial intelligence) свердловин.

Для слабких крейдових карбонатів для значних глибин, що характерно для гірничо-геологічних умов ДДЗ можливі зсувне і порове руйнування влаштованих мікростовбурів бічних відгалужень (гілок). Тому є сенс при використанні технології fishbone-jetting застосовувати спеціальні склади кислот для стабілізації стійкості гірських порід, а також при механічній ерозії зменшувати час дії активної кислоти.

Для мінімізації піскоутворення та ерозії доцільно установлювати піскозахисні екрани (або сучасні технології розумного закінчення свердловини, що можуть автоматично регулювати тиски і швидкості припливу у свердловину продукції) для керування дебітом і рівномірного навантаження гілок.

Наразі відкритим залишається питання інтерференції гілок, оскільки збільшення продуктивності свердловини є нелінійним процесом: надто довгі і щільні гілки збільшують взаємний перетік і зменшують провідність. Тому слід досягати оптимізації довжини, кута й інтервалу між гілками залежно від анізотропії проникності, а також інших гірничо-геологічних умов. Тому через невизначеність геологічних умов і високу анізотропію колекторів із високою карбонатністю слід спершу влаштовувати пілотний стовбур свердловини із коротшими гілками з відповідним циклом досліджень, далі вже проводити масштабування конфігурації свердловини із напрошуванням додаткових гілок.

<https://doi.org/10.2118/191625-MS>.

14. Zimin O. Improvement of Acid Solutions for Stimulation of Compacted High-Temperature Carbonate Collectors. *Technology Audit and Production Reserves*. 2021. Vol. 6(3(62)). P. 11–14. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.246604>.

15. Dong K., Zhu D., Hill A. D. The role of temperature on optimal conditions in dolomite acidizing: An experimental study and its applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018. Vol. 165. P. 736–742. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.03.018>.

16. Xie S., Jiao Y., Lan Y., Wu Y., Cao C. Research on Productivity Management of Gas Wells in Low Permeability Carbonate Reservoir. *Proceedings of the International Field Exploration and Development Conference 2020*. Singapore : Springer. 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-0761-5_40.

17. Zhou M., Xu X., Zhang Y. Experimental study on production performance and reserves utilization law in carbonate gas reservoirs. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2022. Vol. 12. P. 1183–1192. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01377-x>.

18. Zhang H., Cheng J., Zhang X. An Evaluation of the Applicability of the Steady-State Productivity Approach for Horizontal Wells in Low-Permeability Heterogeneous Gas Reservoirs. *Processes*. 2025. Vol. 13. P. 173. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr13010173>.

19. Chen X., Huang Q., Liu P. Review of key technologies for ultra-deep carbonate reservoir development: Acid fracturing and challenges. 2025.

20. Зімін О. Л., Зезекало І. Г. Методика та особливості досліджень фільтраційних властивостей ущільнених глибокозалегаючих гірських порід. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2024. № 1(11). С. 17–24. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/79893> (дата звернення: 27.08.2025).

21. Zezekalo I., Zimin O., Laziebna Y. Increasing the efficiency of stimulation of compacted carbonate reservoirs with acid solutions based on methyl acetate. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 3(6). P. 36–43. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.305373>.

Bibliography (transliterated)

1. Al-Rbeawi S., Artun E. Fishbone type horizontal wellbore completion: A study for pressure behavior, flow regimes, and productivity index. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019. Vol. 176. P. 172–202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.12.076>.

2. Hassan A., Elkatatny S., Abdulraheem A. Application of Artificial Intelligence Techniques to Predict the Well Productivity of Fishbone Wells. *Sustainability*. 2019. Vol. 11, No. 21. P. 6083. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11216083>.

3. Freyer R., Kristiansen T. G., Madland M. V., Omdal E. Multilateral system allowing 100 level 5 laterals drilled simultaneously: dream or reality. *8th European Formation Damage Conference*, Scheveningen, The Netherlands. 2009. Paper SPE-121814-MS. DOI: <https://doi.org/10.2118/121814-MS>.

4. Rice K., Jorgensen T., Waters J. First Installation of Efficient and Accurate Multilaterals Stimulation Technology in Carbonate Oil Application. *SPE Eastern Regional Meeting*, Charleston, WV, USA. 2014. Paper SPE-171021-MS. DOI: <https://doi.org/10.2118/171021-MS>.

5. Torvund S., Stene K., Jensaas H. First Installation of Multilateral Drilling Stimulation Technology in Tight Sandstone Formation. *SPE Western Regional Meeting*, Anchorage, Alaska. 2016. Paper SPE-180390-MS. DOI: <https://doi.org/10.2118/180390-MS>.
6. Xing G., Guo F., Song C. Fishbone Well Drilling and Completion Technology in Ultra-Thin Reservoir. *IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition*, Tianjin, China. 2012. DOI: <https://doi.org/10.2118/155958-MS>.
7. Yu F., Huang G., Ni H. Analysis of the main factors affecting bottom hole assembly Re-entry into main hole in forward drilling of fishbone wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020. Vol. 189. P. 107018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107018>.
8. Elkhatny S., Mahmoud M., Tariq Z., Abdulraheem A. New insights into the prediction of heterogeneous carbonate reservoir permeability from well logs using artificial intelligence network. *Neural Computing*. 2018. Vol. 30(9). P. 2673–2683. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-017-2850-x>.
9. Rachapudi R. V., Al-Jaberi S. S., Al Hashemi M., Punnapala S. Fishbone Stimulation a Game Changer for Tight Carbonate Productivity Enhancement. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition Conference*. 2020. Paper SPE-202636-MS. DOI: <https://doi.org/10.2118/202636-MS>.
10. Bjørnseth F., Kristiansen T. G., Flatebø R. World First Simultaneous Jetting of 72 Laterals with Solids Control. Technology Development and Field Trial. *SPE Norway One Day Seminar*, Bergen. 2019. Paper SPE-195620-MS. DOI: <https://doi.org/10.2118/195620-MS>.
11. Kolle J. Jet turbodrill for enhanced geothermal system development. Tempress. 2009. Technical Report TR-153.
12. Zimin O. L., Zezekalo I. H., Bondar H. M., Yevdoshchuk M. I. Perspektyvy rozrobky ushchilnenykh karbonatnykh kolektoriv u mezhakh Dniprovsko-Donetskoï zapadyny. *Naftohazova haluz Ukrainy*. 2019. № 2. P. 14–18.
13. Burton R. C., Nozaki M., Zwarich N. R., Furui K. Improved Understanding of Acid Wormholing in Carbonate Reservoirs through Laboratory Experiments and Field Measurements. *SPE Journal*. 2020. Vol. 25, No. 2. P. 587–608. DOI: <https://doi.org/10.2118/191625-MS>.
14. Zimin O. Improvement of Acid Solutions for Stimulation of Compacted High-Temperature Carbonate Collectors. *Technology Audit and Production Reserves*. 2021. Vol. 6(3(62)). P. 11–14. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.246604>.
15. Dong K., Zhu D., Hill A. D. The role of temperature on optimal conditions in dolomite acidizing: An experimental study and its applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018. Vol. 165. P. 736–742. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.03.018>.
16. Xie S., Jiao Y., Lan Y., Wu Y., Cao C. Research on Productivity Management of Gas Wells in Low Permeability Carbonate Reservoir. *Proceedings of the International Field Exploration and Development Conference 2020*. Singapore : Springer. 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-0761-5_40.
17. Zhou M., Xu X., Zhang Y. Experimental study on production performance and reserves utilization law in carbonate gas reservoirs. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2022. Vol. 12. P. 1183–1192. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01377-x>.

18. Zhang H., Cheng J., Zhang X. An Evaluation of the Applicability of the Steady-State Productivity Approach for Horizontal Wells in Low-Permeability Heterogeneous Gas Reservoirs. *Processes*. 2025. Vol. 13. P. 173. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr13010173>.

19. Chen X., Huang Q., Liu P. Review of key technologies for ultra-deep carbonate reservoir development: Acid fracturing and challenges. 2025.

20. Zimin O. L., Zezekalo I. H. Metodyka ta osoblyvosti doslidzhen filtratsiinykh vlastyvoitei ushchilnenykh hlybokozaliahaiuchykh hirskykh porid. *Visnyk NTU «KhPI»*. 2024. № 1(11). P. 17–24. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/79893> (data zvernennia: 27.08.2025).

21. Zezekalo I., Zimin O., Laziebna Y. Increasing the efficiency of stimulation of compacted carbonate reservoirs with acid solutions based on methyl acetate. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 3(6). P. 36–43. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.305373>.

УДК 622.245

М. О. Харченко, канд. техн. наук, доцент, Ю. Л. Винников, д-р техн. наук, професор,
О. В. Матяш, канд. техн. наук, доцент, М. О. Рибалко, канд. техн. наук, ст. викладач

ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ СВЕРДЛОВИН В КАРБОНАТНИХ МАЛОПРОНИКНИХ ПЛАСТАХ

У статті представлено результати аналізу сучасних технологічних рішень для підвищення продуктивності свердловин у карбонатних колекторах із низькою проникністю, в т.ч. для високотемпературних. Розглянуто ефективність застосування багатовибійних свердловин типу *Fishbone* як альтернативи гідророзриву пласта для вилучення важковидобувних вуглеводнів у складних гірничо-геологічних умовах, характерних для Дніпровсько-Донецької западини. Проаналізовано світовий досвід буріння багатовибійних свердловин за технологією *Fishbone*. Наведено принципові схеми та параметри відгалужень, особливості їх геометрії та впливу на фільтраційні властивості привибійної зони пласта. Узагальнено результати лабораторних і промислових досліджень щодо технологій *Fishbone Drilling Dreamliner* та *Fishbone Jetting*, у яких спорудження відгалужень здійснюється механічним руйнуванням для колекторів із гірськими породами піщаники та механічною і кислотною ерозією для колекторів із гірськими породами з високою карбонатністю. Розглянуто технологічні рішення компонування бурильної колони для буріння за технологією *Fishbone-jetting*. Особливу увагу приділено підбору кислотних систем для високотемпературних колекторів, де рекомендовано використовувати низьков'язкі розчини на основі метилацетату, що забезпечують глибоке проникнення у пласт і формування розгалуженої системи мікроканалів. Подано узагальнені параметри проектування буріння для глибин 2000...5000 м, ураховано вплив пластових температур, тисків та втрат енергії струменя. Встановлено, що при оптимізації довжини гілок (6...15 м) і їх орієнтації (10...25°) приріст продуктивності свердловин може становити від 1,3 до 3 разів порівняно зі звичайними горизонтальними свердловинами. Запропоновано рекомендації щодо комбінованого використання технології *Fishbone-jetting* із кислотними обробками та системами «розумного» завершення свердловин для

підвищення їх дебіту, надійності та екологічної безпечності експлуатації.

Ключові слова: похилоскероване буріння, технологія Fishbone буріння, багатостовбурна і багатовибійна свердловина, компоновка низу бурильної колони (КНБК), експлуатаційний хвостовик, привибійна зона свердловини (ПЗС), малопроникні карбонатні колектори, кислотна ерозія, механічна ерозія, струминна ерозія, хімічна ерозія, гірські породи, продуктивність.

М. О. Kharchenko, Yu. L. Vynnykov, O. V. Matyash, M. O. Rybalko

TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR ENHANCING WELL PRODUCTIVITY IN LOW-PERMEABILITY CARBONATE RESERVOIRS

The article presents the results of an analysis of modern technological solutions aimed at improving the productivity of wells in carbonate reservoirs with low permeability, including high-temperature formations. The effectiveness of using *Fishbone*-type multi-branched wells as an alternative to hydraulic fracturing for the extraction of hard-to-recover hydrocarbons under complex geological conditions typical of the Dnieper-Donets depression is considered. The global experience of drilling multilateral wells using *Fishbone* technology is analyzed. Basic schemes and parameters of branch laterals, as well as the peculiarities of their geometry and influence on the filtration properties of the near-wellbore zone, are presented. The results of laboratory and field studies on *Fishbone Drilling Dreamliner* and *Fishbone Jetting* technologies are summarized, where branch channels are created by mechanical destruction in sandstone reservoirs and by mechanical-acid erosion in carbonate formations. Technological solutions for the bottom-hole assembly configuration used in *Fishbone-jetting* drilling are reviewed. Particular attention is paid to the selection of acid systems for high-temperature reservoirs, where low-viscosity solutions based on methyl acetate are recommended to ensure deep penetration into the formation and the creation of a branched microchannel system. Generalized design parameters for drilling at depths of 2000...5000 m are provided, taking into account formation temperature, pressure, and jet energy losses. It has been established that with optimal branch length (6...15 m) and orientation (10...25°), the well productivity can increase by 1.3...3 times compared with conventional horizontal wells. Recommendations are proposed for the combined application of *Fishbone-jetting* technology with acid treatments and intelligent completion systems to enhance production rates, reliability, and environmental safety of well operation.

Keywords: directional drilling, Fishbone drilling technology, multilateral and multi-branched well, bottom hole assembly (BHA), borehole hanger, near-wellbore zone (NWZ), low-permeability carbonate reservoirs, acid mechanical jetting and chemical erosion, rock formations, production enhancement.