

Дорошенко В.В.

<https://orcid.org/0009-0000-3509-0809>

Одеський національний технологічний університет

ОТРИМАННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ В НАФТОВІЙ СВЕРДЛОВИНІ ПРОВЕДЕННЯМ ЕКЗОТЕРМІЧНОЇ ХІМІЧНОЇ РЕАКЦІЇ

Питання отримання теплової енергії, як головного завдання теплоенергетичного комплексу, невіддільно пов'язано з забезпеченням первинними джерелами енергії, серед яких превалююча роль належить нафті.

На тлі важливості нафти, як домінуючого джерела отримання теплової енергії, розробка більшості нафтових родовищ перейшла у пізню або стагнуючу стадію при наявності значної кількості залишкових і важковидобувних запасів. Це ускладнюється і тим, що наявна частка невироблених запасів представлена високопарафіністими нафтами в умовах близькості пластової температури і температури насичення нафти парафіном, спричиняючи його кристалізацію і зменшення пропускної здатності порових каналів.

Для збільшення видобутку нафти шляхом розплавлення і усунення парафінових відкладів, запропоновано і досліджено процес отримання теплової енергії шляхом використання термохімічного ефекту від екзотермічної реакції гранульованого магнію з солянокислотним розчином.

Запропоновано мобільну конструкцію автоклава високого тиску для дослідження і вивчення процесу отримання теплової енергії з використанням екзотермічної хімічної реакції.

Представлено результати досліджень щодо впливу тиску на кінетику реакції та ефективності отримання теплової енергії в свердловинних умовах.

Експериментально підтверджено, що при зростанні тиску швидкість розчинення магнію в солянокислотному розчині знижується через утворення на поверхні гранул водневої газової оболонки, перешкоджаючої процесу дифузії реагентів.

Отримано емпіричне рівняння залежності швидкості реакції від тиску та досліджено динаміку зміни температури в зоні реакції.

На прикладі Луквинського нафтового родовища показано розрахунок отримання теплової енергії на вибої типової свердловини.

Результатами досліджень підтверджено доцільність і перспективність застосування термохімічних реакцій для ініціювання теплової енергії в свердловинних умовах.

Представлені результати досліджень є підставою для подальшого вивчення і розробки технологічних процесів в напрямку використання теплової енергії щодо повноти вилучення вуглеводнів з надр і забезпечення теплоенергетики надійним джерелом первинної енергії.

Ключові слова: *теплова енергія, екзотермічна хімічна реакція, гранульований магній, соляна кислота, тиск, температура.*

Постановка проблеми. Сучасний стан паливно-енергетичного комплексу України характеризується виснаженням ресурсів традиційних родовищ та переходом більшості з них у пізню стадію розробки. Однією з ключових проблем цієї стадії є значне падіння пластової температури та зміна термодинамічного стану покладу. Це призводить до інтенсивного формування асфальто-смолистих та парафінових відкладів у пористому середовищі та стовбурі свердловин, що критично знижує їхню продуктивність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Отримання теплової енергії є головним завданням теплоенергетики, як галузі, яка об'єднує енергетичні ресурси та енергоносії, виробництво, перетворення, передачу і використання різних форм енергії.

На даний час у вироблені теплової енергії більш як 85% складають нафта, газ, вугілля і уран, причому найпоширенішим енергоносієм залишається нафта, частка якої в структурі світових первинних джерел енергопостачання складає біля третини [1, 2, 3].



В цьому аспекті важливим залишається питання забезпечення паливно-енергетичного комплексу вуглеводнями [4], однак, більшість працюючих родовищ Європи і України перейшли у пізню стадію розробки, яка характеризується монотонним зниженням видобутку нафти [5, 6, 7].

Для пізньої стадії розробки характерно і те, що на тлі зменшення видобутку, в покладах залишаються суттєві залишкові запаси нафти, які зосереджуються у невірбованих ділянках пласта і відносяться до категорії важковидобувних [8, 9, 10].

Ускладнюючим чинником розробки таких родовищ є утворення і нагромадження в поровому просторі, перфораційних отворах і у стовбурі свердловин парафінових відкладів, які провокують зменшення очікуваного видобутку нафти.

Ця проблема, головним чином, спричинена порушенням термодинамічного стану покладу внаслідок прояву ефекта Джоуля-Томсона при русі нафтогазової суміші та проведення у свердловинах ремонтно-відновлюваних робіт з нагнітанням в них «холодних» рідин з поверхні [11, 12] і вимагає теплової дії на «забруднені» ділянки.

Постановка завдання. Метою даної роботи є обґрунтування та дослідження процесу генерування теплової енергії безпосередньо у вибої нафтової свердловини за рахунок екзотермічної реакції взаємодії гранульованого магнію з солянокислотним розчином для інтенсифікації видобутку нафти на пізній стадії розробки родовищ.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- експериментально встановити вплив гідростатичного тиску на кінетику реакції розчинення магнію та динаміку зміни температури в зоні реакції;

- визначити математичну залежність швидкості реакції від зовнішнього тиску та часу для прогнозування тривалості теплового впливу;

- виконати практичний розрахунок необхідної кількості реагентів та очікуваного температурного ефекту на прикладі типової свердловини Луквинського нафтового родовища для підтвердження технологічної ефективності методу.

Виклад основного матеріалу. Одним з напрямків збільшення повноти вилучення важковидобувних залишкових запасів нафти є застосування теплоенергетичних технологій, заснованих на принципах хімічної термодинаміки, як фундаментальної основи управління енергетичними процесами в теплоенергетиці.

Реалізація цього напрямку досягається проведенням термохімічних обробок свердловин з отриманням тепла за рахунок екзотермічної

хімічної реакції [13, 14]. В основу обробок покладено реакцію гранульованого магнію з соляною кислотою:



В результаті реакції виділяється 4520 ккал тепла на 1 кг магнію. Фізична густина магнію – 1740 кг/м³, насипна – 880 кг/м³ при діаметрі гранул – 0.5...1.25 мм. Водень завжди виділяється у газоподібному стані і навіть при пластових тисках і температурах розчинність його у воді (відпрацьований розчин кислоти) досить низька – 18 мл/л.

Виробництво гранульованого магнію фракції 0,5...1,0 мм, який є базовим реагентом при термохімічних обробках, розпочато в Україні [15], а пізніше в Китаї були введені в експлуатацію дві промислові установки з виробництва гранульованого магнію за українською технологією [16].

Технологічно термохімічна обробка полягає у створенні у стовбурі свердловини в інтервалі перфорації вогнища реакції гранульованого магнію з 15% солянокислотним розчином.

Технологія може реалізуватися за двома схемами (рис. 1). За схемою **A** інтервал перфорації у стовбурі свердловини заповнюється гранулами магнію з наступною доставкою до нього солянокислотного розчину. За схемою **B** навпаки – магній доставляється (намивається) в інтервал перфорації, попередньо заповнений солянокислотним розчином. Після завершення реакції відпрацьований солянокислотний розчин відтискається в пласт для передачі теплової енергії для розплавлення парафінових відкладів і деблокування порових каналів.

Взаємодію магнію з соляною кислотою при термохімічних обробках свердловин висвітлено в роботах [17, 18, 19], однак в них не враховано особливості перебігу реакції в умовах тисків, близьких до свердловинних.

В нормальних умовах гранульований магній реагує з соляною кислотою інтенсивно з бурхливим виділенням водню, що сприяє перемішуванню ним розчину, вирівнюванню його концентрації та прискоренню інтенсивності реакції. При збільшенні тиску в системі, зменшується об'єм водню і погіршується відведення продуктів реакції від поверхні гранул у розчин. Реакція з кінетичної переходить у дифузійну фазу [20, 21, 22].

Для дослідження кінетики реакції гранульованого магнію з соляно-кислотним розчином при високих тисках нами змонтовано мобільний автоклав, головною складовою якого є термоізолюваний контейнер високого тиску 1, який заповнюється гасом до заданого тиску (рис. 2).

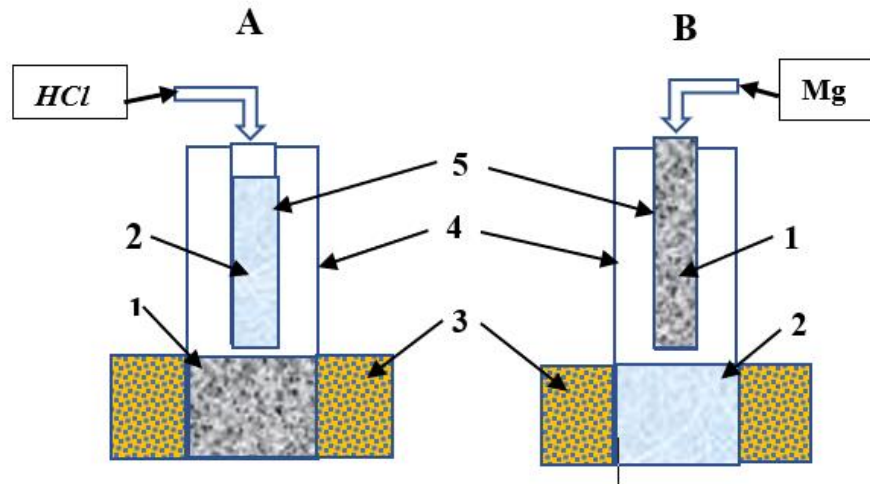


Рис. 1. Принципові схеми локалізації теплової енергії на вибої свердловини

1 – гранули магнію; 2 – солянокислотний розчин; 3 – продуктивний пласт; 4 – стовбур свердловини (експлуатаційна колона); 5 – насосно-компресорні труби

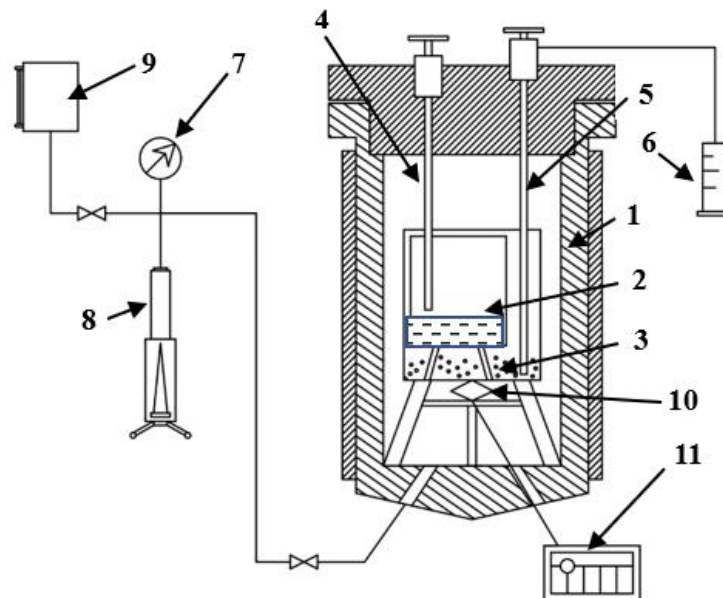


Рис. 2. Автоклав для дослідження кінетики хімічних реакцій при тисках до 40 МПа і температурах до 150 °С

В середині автоклава розташований скляний стаканчик 2 з кислотою, дно якого руйнується латунним стрижнем 4 для ініціювання початку реакції та фарфорова ємність 3 з реагентним матеріалом (гранульований магній). Забір проб кислоти, не зупиняючи плинину реакції під тиском, здійснюється за допомогою хімічно-пасивної трубки 5 у мензурку 6. Підтримання заданого тиску в процесі відбору проб відпрацьованого кислотного розчину, відповідно до показів зразкового манометра 7, забезпечується ручним гідравлічним пресом 8 з ємності з газом 9. Визначення температури в зоні екзотермічної реакції виконується за допомогою термодатчика 10 з передачею

інформації на реєструючий прилад 11. Концентрація кислоти у вихідному розчині та пробах, що відбираються, визначається титриметричним методом.

При виконанні досліджень використовувалася постійна надлишкова кількість кислоти (0.22 г-екв або 53.47 г) та постійна кількість магнію ($G_2 = 1.3 \cdot g$).

Розрахунок кількості магнію, що прореагував (G_1) визначається за рівнянням:

$$G_1 = 12,15 V_1 (N_0 - N_k), \quad (2)$$

де N_0 , N_k – початкова та поточна концентрації кислоти, г-екв/л; V_1 – об'єм кислоти, л. Почат-

кова концентрація кислоти (N_0) в дослідях відповідала 15 %.

На рис. 3, за отриманими експериментальними даними, представлено криві залежності кількості розчиненого магнію ($G_1, \cdot 10^{-3}$ кг) у 15% солянокислотному розчині при тисках 10, 20 і 30 МПа, що відповідає діапазону величин гідростатичного тиску в свердловині в зоні реакції (рис. 1).

На рис. 4 представлено результати досліджень зміни температури в зоні реакції при тиску 10 МПа, в межах якого працює більшість нафтових родовищ України, що перебувають в пізній стадії розробки [7, 12].

Експериментальними дослідженнями підтверджено, що швидкість реакції, як і інтенсивність отримання теплового ефекту суттєво сповільнюються зі збільшенням тиску в зоні реакції (рис. 3, 4). Так, при тиску 10 МПа температура досягає близько 130 °С протягом перших 130...150 с, а потім монотонно знижується, що викликано,

головним чином, зменшенням площі поверхні контактуючих фаз та концентрації кислотного розчину.

Математична інтерпретація результатів експерименту [26, 27] для тисків в системі від 0 до 30 МПа достатньо добре описується емпіричним рівнянням:

$$G_1 = G_2 \left[1 - \exp\left(0.41e^{-0.693P^{0.531}} \tau^{0.39-0.002P}\right) \right], \quad (3)$$

де P – тиск в зоні реакції, МПа, τ – час з початку реакції, год.

За рівнянням (4) визначається і час розчинення гранульованого магнію у 15% солянокислотному розчині при тисках в системі до 30 МПа:

$$\tau = \left[\frac{\ln\left(1 - \frac{G_1}{G_2}\right)}{-0.41 \exp\left(-0.63P^{0.531}\right)} \right]^{1/0.39-0.002P} \quad (4)$$

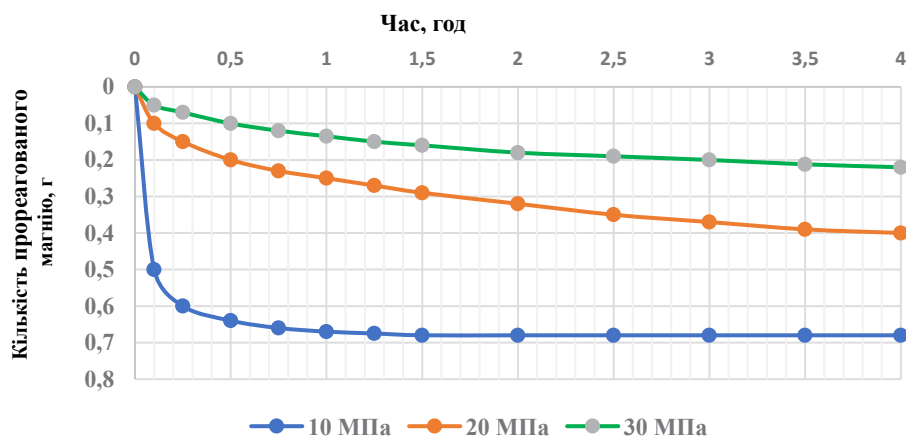


Рис. 3. Кінетичні криві розчинення гранульованого магнію у 15% солянокислотному розчині при тисках 10, 20 і 30 МПа

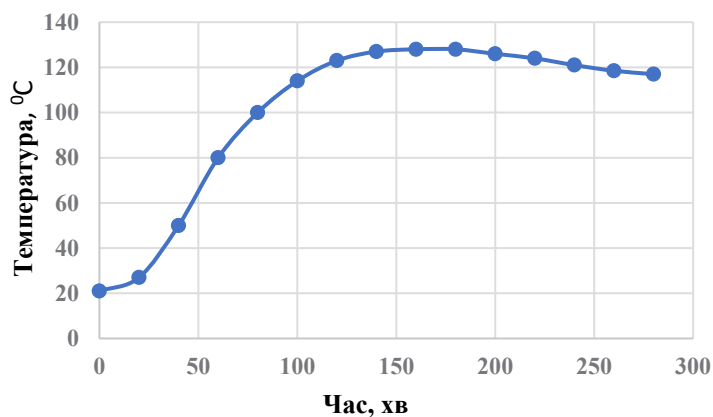


Рис. 4. Динаміка зміни температури в зоні реакції при тиску 10 МПа

Взаємодія магнію з соляною кислотою відноситься до гетерогенних реакцій і активно відбувається у тому випадку, коли має місце безперервна молекулярна або конвективна дифузія реагуючих речовин до поверхні гранул та безперервна зворотня дифузія продуктів реакції. Швидкість процесу дифузії прямо-пропорційна градієнту речовини, а швидкість розчинення магнію – квадрату концентрації кислоти на поверхні гранул [25]. Взаємозв'язок цих двох процесів і обумовлює зміну швидкості реакції з часом. Так, при тиску 10 МПа біля 60% маси магнію розчиняється в солянокислотному розчині за 1 год (рис. 3). Ймовірно це викликано більш активною дією водню на перемішування розчину. Зі збільшенням тиску зменшуються розміри бульбашок водню і ускладнюється їх відрив від поверхні гранул магнію. Така газова оболонка перешкоджає активному контакту магнію з кислотою, зменшуючи площу поверхні гранул, на якій відбувається реакція і, тим самим, збільшуючи час розчинення магнію.

З огляду на реальний об'єкт, наприклад Луквинське нафтове родовище [12, 28], де температура кристалізації парафіну (35 °С) близька до пластової (38 °С) при температурі його плавлення 55 °С, необхідно у фільтровій, найбільш забрудненій частині стовбура свердловини, отримати кількість теплової енергії, достатньої для розплавлення парафінових відкладів.

В першому наближенні, необхідна кількість тепла для розплавлення нафтового парафіну визначається за калориметричним рівнянням:

$$Q = (T_k - T_n) \cdot (\varepsilon_{HCl} \cdot V_{HCl} + \varepsilon_k \cdot V_k), \quad (5)$$

де T_k – температура в зоні реакції, °С; T_n – температура пласта, °С; ε_{HCl} – питома теплоємність солянокислотного розчину, ккал/кг °С; ε_k – питома теплоємність труб експлуатаційної колони, ккал/кг °С; V_{HCl} – об'єм солянокислотного розчину, м³; V_k – об'єм металу труби в межах інтервалу перфорації, м³.

З наступного рівняння можна отримати температуру, яку необхідно досягти для розплавлення парафінових відкладів шляхом проведення екзотермічної реакції магнію з соляною кислотою:

$$\Delta T = \frac{Q \cdot m_{Mg}}{m_{HCl} \cdot \varepsilon_{HCl} + m_k \cdot \varepsilon_k}, \quad (6)$$

де m_{Mg} та m_{HCl} маса магнію та кислоти відповідно.

Для реалізації процесу, приміром по схемі А (рис. 1), для типової свердловини Луквинського родовища з діаметром експлуатаційної колони 0,168 м і довжиною фільтра (інтервал перфорації) 10 м, знадобиться 86 кг гранульованого магнію (насіпна густина 880 кг/м³) і 3,5 м³ 15% солянокислотного розчину, а температура, що буде досягнута в процесі екзотермічної реакції магнію з соляною кислотою за рівнянням (6) буде сягати 163,8 °С.

Представлені результати щодо отримання теплової енергії на вибої свердловини свідчать про можливість досягнення температури суттєво вищої за температуру плавлення парафіну.

Таким чином, застосування принципів теплоенергетики в частині отримання тепла за рахунок проведення екзотермічної реакції дає можливість звільнити прифільтрову зону від парафінових відкладів та збільшити продуктивність свердловини по нафті.

Висновки. Доведено ефективність застосування екзотермічної хімічної реакції як методу отримання теплової енергії на вибої нафтових свердловин.

Показано, що реакція гранульованого магнію із соляною кислотою дозволяє створити локальний осередок теплової енергії на вибої свердловини, що спрямовано на очищення її фільтрової частини від парафінових відкладів, збільшення дебіту і повноти вилучення залишкових важковидобувних запасів нафти.

Запропоновано принципову конструкцію мобільного автоклава високого тиску для оперативного вивчення кінетики екзотермічних реакцій в умовах, наближених до реальних свердловинних.

Експериментально підтверджено вплив тиску на швидкість гетерогенних реакцій, що супроводжуються виділення газоподібної фази.

Отримано емпіричне рівняння кінетики розчинення магнію в солянокислотному розчині в координатах «тиск-час реакції».

Показано процедуру отримання теплової енергії на прикладі типової свердловини Луквинського нафтового родовища.

Список літератури:

1. Кириленко О. В. та ін. Енергетика України: імовірні сценарії відновлення та розвитку. *Вісник НАН України*, 2022. № 9. DOI: <https://doi.org/10.15407/vishn2022.09.022>
2. Басок Б. І., Базєєв Ю. Т. Енергетика, наука і інженерія сьогодення: стан та виклики розвитку. *Теплофізика та теплоенергетика*, 2023. № 45(1). DOI: <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.01>
3. Zimmermann, J. Ohne fossile Energien geht es nicht. *Brennstoffspiegel und Mineralölrundschau*, 2009. № 10.
4. Амоша О. І., Гарковенко Г. Л. Світовий паливно-енергетичний комплекс: сучасний стан та тенденції розвитку. *Економіка промисловості*, 2006. № 4.
5. Дорошенко В. М., Тітлов О. С., Купер І. М., Дорошенко В. В. Особливості пізньої стадії розробки нафтових родовищ України та шляхи збільшення видобутку нафти. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, 2024. № 2.
6. Дорошенко В. В., Тітлов О. С. Розгляд принципів стабілізації та збільшення видобутку нафти на пізній стадії розробки родовищ на прикладі родовищ України. *Технологічний аудит та резерви виробництва*, 2021. № 2/1(58).
7. Тітлов О. С., Дорошенко В. В. Парадигма пізньої стадії розробки нафтових родовищ. Збірник праць XXIII Всеукраїнської науково-технічної конференції «Актуальні проблеми енергетики та екології», Одеса, 2024.
8. Орловський В. М., Білецький В. С., Сіренко В. І. Нафтогазовилучення з важкодоступних і виснажених пластів, Львів, 2023.
9. Витвицький Я. С., Пілка М. С. Аналіз ресурсного потенціалу та економічних проблем нафтовидобування в Україні із родовищ, запаси яких відносяться до категорії важковидобувних. *Науковий вісник ІФНТУНГ. Серія: Економіка та управління в нафтовій і газовій промисловості*, 2016. № 1(13). DOI: [https://doi.org/10.31471/2409-0948-2016-1\(13\)-10-14](https://doi.org/10.31471/2409-0948-2016-1(13)-10-14)
10. Бойко В. С., Кондрат Р. М., Яремійчук Р. С. (ред.). Довідник з нафтогазової справи. Львів – Івано-Франківськ : Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу, 1996.
11. Дорошенко В. В. Особливості термодинамічних змін в нафтогазонасиченому пористому середовищі. Зб. праць XXIII Всеукраїнської науково-технічної конференції «Актуальні проблеми енергетики та екології», Одеса, 2024.
12. Світлицький В. М., Іванків О. О., Ягодовський С. І., Тітлов О. С. Термодинамічний вплив на привибійну зону продуктивних пластів. Одеса, 2024.
13. Бойко В. С. Технологія видобування нафти : підручник. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2012. 827 с.
14. Акульшин О. І. та ін. Технологія видобування, зберігання і транспортування нафти і газу Івано-Франківськ, 2003.
15. Бараннік І. А., Савенець Ю. І. Українському гранульованому магнію – п'ятдесят років. *Металознавство та литво України*, 2021. № 29 (4). С. 58–63.
16. Bol'shakov V. I., Shevchenko A. F., Aleksandrov V. A. et al. Creation and industrial application of modern hardware and technological complexes for iron desulfurization at metallurgical plants in China. *Iron and Steel Industry and Metal Mining Industry*, 2004, № 4.
17. Тарко Я. Б. Деякі хіміко-технологічні аспекти проведення термокислотних оброблень продуктивних пластів. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»*. 2004. № 11. С. 61–67.
18. Пустоголов В. І., Орфанова М. М., Орфанова М. М. Дослідження фізичних процесів теплової дії на привибійну зону нафтового пласта. *Нафтогазова енергетика*. 2010. № 1 (12). С. 15–20.
19. Качмар Ю. Д., Світлицький В. М., Синюк Б. Б., Яремійчук Р. С. Інтенсифікація припливу вуглеводнів у свердловину. Львів : Центр Європи, 2004. Кн. 2. 352 с.
20. Романова Н. В. Загальна та неорганічна хімія : підручник. Київ : Ірпінь: ВТФ «Перун», 2002. 480 с.
21. Левандовський І. А., Примиська С. О. Кінетика і термодинаміка в хімічних технологіях органічних речовин. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 144 с.
22. Rankin W. J. *Chemical Thermodynamics. Technology & Engineering, Science. Publication Year Taylor & Francis Ltd.* 2019. DOI: 10.1201/9780429323058
23. Савенков Г. Д., Дорошенко В. М., Зарубін Ю. О. Автоклав для проведення досліджень в промислових умовах. *Нафтопромислова справа*. 1975. № 13.
24. Platt, C. *Encyclopedia of electronic components* (2012). Reilly/Make. ISBN 978-1-4493-3387-4.
25. Moubarak R. et al. A self-calibrating mathematical model for the direct piezoelectric effect of a new MEMS tilt sensor. *IEEE Sensors Journal*. 2011. № 12(5). P. 1033–1040. DOI: 10.1109/JSEN.2011.2163391
26. Дорошенко В. М., Тітлов О. С., Сагала Т. А., Біленко Н. О. Основи наукових досліджень. Одеса : ОНТУ, 2019.
27. Мислик М. А., Зарубін Ю. О. Моделювання явищ і процесів у нафтогазопромисловій справі. Івано-Франківськ : Таля, 1999. 494 с.
28. Атлас родовищ нафти і газу України : у 6 т. Західний нафтогазоносний регіон / під ред. М. М. Іваницького. Львів : УНГА, 1998. Т. 5.

Doroshenko V.V. THERMAL ENERGY GENERATION IN AN OIL WELL VIA AN EXOTHERMIC CHEMICAL REACTION

The issue of generating thermal energy, as the primary task of the thermal power complex, is inextricably linked to the provision of primary energy sources, among which oil plays a predominant role.

Despite the importance of oil as a dominant source of thermal energy, the development of most oil fields has moved into a late or stagnant stage, characterized by a significant amount of residual and hard-to-recover reserves. This situation is further complicated by the fact that a substantial portion of unproduced reserves consists of high-paraffin oils. Under conditions where reservoir temperatures are close to the paraffin saturation temperature, crystallization occurs, leading to a reduction in the flow capacity of pore channels.

To enhance oil recovery by melting and removing paraffin deposits, a process for generating thermal energy using the thermochemical effect of an exothermic reaction between granulated magnesium and a hydrochloric acid solution has been proposed and investigated.

A mobile high-pressure autoclave design has been developed to research and study the process of thermal energy generation via this exothermic chemical reaction. The study presents research results regarding the influence of pressure on reaction kinetics and the efficiency of heat generation under downhole conditions.

It has been experimentally confirmed that as pressure increases, the dissolution rate of magnesium in the hydrochloric acid solution decreases. This occurs due to the formation of a hydrogen gas envelope on the surface of the granules, which hinders the diffusion of reactants. An empirical equation describing the dependence of the reaction rate on pressure was obtained, and the dynamics of temperature changes in the reaction zone were investigated.

Using the Lukvynske oil field as an example, the calculation of thermal energy generation at the bottomhole of a typical well is demonstrated. The research results confirm the feasibility and promising nature of using thermochemical reactions to initiate thermal energy under downhole conditions.

The presented findings serve as a basis for further study and development of technological processes aimed at utilizing thermal energy to maximize hydrocarbon recovery and ensure a reliable source of primary energy for the thermal power industry.

Keywords: *chemical thermal energy, exothermic reaction, granulated magnesium, hydrochloric acid, pressure, temperature.*

Дата першого надходження статті до видання: 15.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 06.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026