

Геотермальні ресурси

Підвищення техногенної безпеки держави в питаннях
освоєння свердловинних геотермальних ресурсів

2018

Вступ

Ефективне дослідження причин виникнення надзвичайних ситуацій у процесі освоєння геотермальних ресурсів (ГТР) фондом свердловин вимагає комплексного уявлення про роботу складових підприємств, що технологічно пов'язані між собою.

Процес освоєння ГТР має завершену функціонально-інформаційну структуру, що забезпечена супроводом методологічної бази ГТР методологічної бази, яка є основою інформаційних технологій освоєння ГТР, що направляють і регламентують паралельні і послідовні виробничі алгоритми дій для досягнення однієї мети. Мета досягається шляхом комплексної організації системи управління структурними підрозділами, що виконують спеціалізовані виробничі функції з технологічними і економічними параметрами.

Актуальність. Методи і засоби попередження, локалізації та ліквідації надзвичайних ситуацій в Україні, тісно пов'язаний з процесом освоєння природних ресурсів (ВВР) глибокими (більше 3000 м) свердловинами, виконується на промисловому рівні протягом 65 років, а процес освоєння геотермальних ресурсів (ГТР) неглибокими (до 1900 м) свердловинами з використанням пластових геотермальних вод виконується на дослідно-промисловому рівні протягом 50 років. проводить тільки одна компанія. Процеси освоєння геотермальних ресурсів зв'язані між собою тільки геологічними умовами, оскільки виконуються у геотермально активних зонах, на долю яких припадає 61,5% території, 67% населення і 64 % національного валового продукту.

Функціональна і інформаційна структура зв'язків виробничих функцій процесу освоєння ВВ оновлювалась але не змінювалась, а структура процесу освоєння ГТР взагалі не розвивалась. Тільки останні 10 років в Україні почали

звертати увагу на власні геотермальні ресурси, оскільки 70 країн світу розвивають функціональну і інформативну структуру з освоєння ГТР. Перший тендер з розроблення перших нормативних документів в Україні з освоєння ГТР проведений у 2012 р. Основною причиною повільного розвитку процесу освоєння ГТР в Україні вважається низький рівень щільності теплового потоку у земних надрах, оцінка якого (Національний атлас України) відома на рівні 70-150 мВт/м².

Процес освоєння природних ресурсів має завершену функціонально-інформаційну структуру, що забезпечена супроводом нормативної бази. Нормативна база є основою інформаційних технологій, що направляє і регламентує паралельні і послідовні виробничі алгоритми дій для досягнення однієї мети.

Метою роботи є: розробка інформаційно-функціональної математичної моделі системи оптимального управління процесом освоєння теплоенергетичних ресурсів, що включає технологічні і економічні виробничі функції з параметрами ефективності: інформаційних технологій пошуку ПЕР на етапі проектування і буріння свердловин, процесів використання бурової техніки та інструменту, процесу освоєння геотермальних ресурсів, процесу інвестування основних виробничих функцій, а також з параметрами державної податкової системи, енергетичного ринку, факторів впливу на зменшення (збільшення) видобутку ПЕР, зокрема, **методів та засобів моніторингу і прогнозування технологічних процесів, які обумовлюють виникнення і розвиток надзвичайних ситуацій**, що дозволить виконувати оцінку і прогноз показників освоєння ресурсів при поступовому переводі бездіючого фонду глибоких свердловин на освоєння геотермальних ресурсів, як умови стабільної і надійної продуктової, екологічної і енергетичної безпеки населення України, при застосуванні інноваційних технологій у процесах пошуку і розробки термоенергетичних ресурсів глибокими свердловинами шляхом розв'язання наступних задач.

Задачі досліджень. Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі.

Дослідити методи моделювання технологічних і економічних процесів, особливості проблеми математичного моделювання процесу освоєння ПЕР та розробити імітаційну функціонально-інформаційну детерміновану математичну модель технологічного процесу освоєння ПЕР фондом свердловин з параметрами виробничих функцій «продуктивності» бурових установок, «успішності» ГРР, «розкриття» продуктивних горизонтів.

Вдосконалити математичні методи з визначення параметрів виробничих функцій «успішності» ГРР і «розкриття» продуктивних горизонтів, а саме, інформаційних технологій інтерпретації даних сейсмозв'язки та обробки даних геолого-технологічних досліджень свердловин з використанням засобів контролю режимно-технологічних параметрів процесу буріння для визначення пружних фізико-механічних і гідродинамічних параметрів продуктивних горизонтів.

Дослідити та вдосконалити математичні методи визначення параметрів виробничої функції «продуктивності» БУ та критерію оптимальності процесу буріння свердловин, а саме, визначення параметру функціональної якості у моделі реалізації моторесурсу бурових установок та оптимальних параметрів динамічних навантажень бурового обладнання та інструменту з використанням систем комп'ютерного моделювання.

Дослідити та вдосконалити математичні методи оцінки енергетичних характеристик дії геотермального фактору на простір свердловини та розробити метод оцінки ефективності освоєння теплової енергії гірських порід в системі управління процесом освоєння паливно-енергетичних ресурсів.

Об'єкт досліджень – процес освоєння геотермальних ресурсів, що включає основні виробничі функції: видобуток ресурсів, буріння експлуатаційних свердловин, буріння пошуково-розвідувальних свердловин з геофізичними методами дослідження геологічного середовища, фонд свердловин, бурову техніку та інструмент, гідродинамічні процеси, а також

економічні процеси інвестування основних виробничих функцій, формування та використання доходу і прибутку, податкових відрахувань, ціноутворення.

Предмет дослідження. математичні методи і комп'ютерні засоби моделювання: процесу освоєння геотермальних ресурсів, інформаційних технологій пошуку і розробки ресурсів, систем оптимального управління технологічними і економічними процесами, процесів використання бурової техніки та інструменту, гідродинамічних процесів під час буріння свердловин, дії геотермального фактору на простір свердловини і енергоносій..

Мета і завдання. Оцінка геотермальних ресурсів України на основі експериментальних даних щодо теплофізичних параметрів ГС у процесі буріння і геофізичного дослідження глибоких і надглибоких свердловин на нафту і газ.

Методи дослідження.

Аналіз експериментальних технічних і технологічних характеристик процесів освоєння геотермальних ресурсів.

Комп'ютерне обчислення процесів освоєння геотермальних ресурсів з використанням варіаційних, статистичних та методів математичного аналізу, математичної фізики і теорії оптимального управління та математичного експерименту.

Експериментальні випробування технічних і інформаційних моделей процесів освоєння вуглеводневих і геотермальних ресурсів.

Новизна. На основі теоретичних досліджень отримані наступні наукові результати:

- Розроблена функціонально-інформаційна модель технологічного процесу освоєння ПЕР фондом свердловин, що включає виробничі функції «продуктивності» бурових установок, «успішності» ГРР, «розкриття» продуктивних горизонтів, що дозволяє оцінювати енергоефективність і продуктивність процесу та прогнозування технологічних процесів, які обумовлюють виникнення і розвиток надзвичайних ситуацій.

- Розроблено математичний метод оптимізації процесу буріння на основі енергетичного моторесурсу породоруйнівного інструменту, що надає наукове обґрунтування розробленню нормативної бази на витрати доліт за критерієм мінімальна вартість метру буріння свердловин та забезпечує збільшення видобутку з дослідженням причин виникнення надзвичайних ситуацій.
- Розроблено математичну модель дії геотермального фактора на простір свердловини, що дозволило визначити промислові енергетичні параметри теплових потоків у свердловині з боку гірських порід, отримати максимальне значення функції «успішності» моделі технологічного процесу освоєння, а також, розвивати самостійний напрямок промислового освоєння ГТР з розв'язанням енергетичної і екологічної проблеми в Україні шляхом використання геотермальних, геотермоелектричних, геотермоелектроводних енергетичних установок з моніторингом технологічних процесів, які обумовлюють виникнення і розвиток надзвичайних ситуацій.

Практичне значення.

- Науково-технічна концепція модернізації і оновлення парку бурових установок на дослідному зразку модернізованої БУ показала підвищення функції «продуктивності» БУ під час спорудження свердловин.
- Розроблений метод визначення коефіцієнта Пуасона геологічного середовища за даними сейсморозвідки дозволяє підвищити показання функції «успішності» пошуку геотермальних покладів.
- Метод ефективного використання породоруйнівного інструменту дозволяє суттєво зменшити витрати на спорудження глибоких свердловин та прискорити освоєння геотермальних ресурсів.
- Комплексна математична модель оптимальної системи управління паливно-енергетичних ресурсів дозволяє оцінювати і прогнозувати показники видобутку при змінах економічних і технологічних параметрів.

1. Методи і засоби математичного моделювання детерміновано-стохастичних процесів

Математичне моделювання систем і процесів є науковим методом об'єктивного бачення фізичних, хімічних, біологічних, соціальних, економічних процесів і процесів мислення.

Методологія математичного моделювання розвивається двома напрямками: перший – за законами математики, а другий – за законами фізики. Кожен з цих напрямків вимагає відповідну властивість логіки для наукового дослідження об'єкту. Так склалися два методологічні аспекти мислення: детермінізм, що дотримується при створенні обчислювальних схем жорсткої причинно-наслідкової системи зв'язків у однорідних процесах і стохастичизм, що розглядає множину випадкових процесів, які характеризуються невідомими зв'язками параметрів. Останні при масштабній перевазі утворюють нову якість – детермінований рух.

Так почав формуватися і розвиватися новий методологічний напрямок математичного моделювання [1]. В основу даної методології у роботі розглянуто фрактальну концепцію детермінованого хаосу підтверджену власними дослідженнями і аналізом [2] більше 50 наукових праць з астрономії, радіофізики, фізики твердого тіла, біофізики, біології, хімічної кінетики, інформатики, економіки, екології, медицини та інших галузях науки і техніки.

Саме у рамках даної методології і проведені наукові дослідження у даній роботі із моделювання виробничих процесів (ВП) – освоєння вуглеводневих (ВВР) і геотермальних ресурсів (ГТР) (разом – паливно-енергетичні ресурси ПЕР), що складаються з технологічних і економічних процесів, що характеризуються детерміновано-стохастичними властивостями, у вигляді комплексної системи управління процесом освоєння ПЕР: інвестування основних ВП, пошук ПЕР, буріння, розвідувального і експлуатаційного фонду свердловин, видобування ПЕР, реалізація ПЕР.

На рис. 1.1. а) наведено уявлення про детермінований хаос, що розглядається у роботі [3] для моделювання економічних процесів, а на рис. 1. б) наведена ідея використання даного уявлення у даній роботі для агрегації і дезагрегації параметрів процесу освоєння ПЕР з метою розроблення детермінованої моделі процесу освоєння ПЕР.

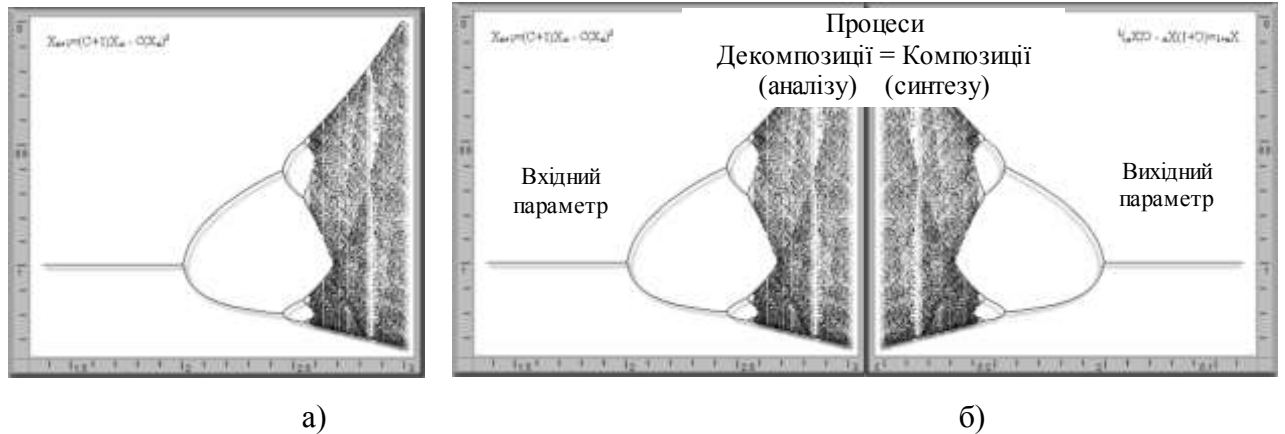


Рис. 1. Уявлення про детермінований хаос та його модель $E = f(E)$:

а) подвоєння частоти сталої динамічної системи (моделі Ресслера [4-6]);

б) прямий процес декомпозиції вхідного параметру (наприклад, інвестиції) змінюється на процес композиції вихідного параметру – дохід

Оскільки даний напрямок моделювання виробничих процесів тільки розвивається, то проведемо аналіз поширеного досвіду підходів до математичного моделювання виробничих функцій, що накопичений за останні 100 років.

2. Проблеми комплексного математичного моделювання процесу освоєння паливно-енергетичних ресурсів фондом свердловин

Процес освоєння ВВР складається з п'яти самостійних процесів: інвестування, геологорозвідувальні роботи, буріння експлуатаційних свердловин і видобування з фонду експлуатаційних свердловин, реалізація продукції. Процеси в комплексі стійко пов'язані між собою інформаційно і

функціонально, але не мають комплексної математичної моделі, що не дозволяє розв'язати задачу оптимального управління процесом в цілому.

Інформація про геологічну будову родовищ та продуктивні горизонти є первинним джерелом для реалізації пошуково-розвідувального і експлуатаційного буріння свердловин. Тому розроблення виробничих функцій процесу освоєння вуглеводнів почнемо з огляду та формалізації геологічної інформації про геофізичну будову об'єктів з перспективними ПЕР і визначення термінів його реалізації.

Проблеми математичного моделювання технологічного процесу освоєння ВВР і ГТР пов'язані зі статистичним нормальним розподілом ВВР за глибиною залягання і складністю геологічних умов виявлення даного розподілу.

Розглянемо геологічну інформацію щодо освоєння ВВР.

В табл. 1-2 наведені дані [10-12] про видобувні, розвідані і початкові запаси ВВР в Україні в залежності від глибини їх залягання. (див.Додаток А)

На рис. 1 за фактичними геологічними даними табл. 1-3 наведені характеристики розподілу запасів і ресурсів за глибиною залягання продуктивних горизонтів в Україні, визначені за рівнянням (див.Додаток А)

$$q_0(L) = \frac{(A + B + C1 + C2 + C3)}{k}, \quad (1)$$

де $k = \frac{(A + B + C1 + C2 + C3)}{9322,7}$ – постійний коефіцієнт.

За даними, що наведені у табл. 1-3 і графічно на рис. 2, розроблена загальна математична модель (2) розподілу ВВР за глибиною залягання продуктивних горизонтів виду

$$q_{0m}(L) = \frac{1}{\sigma_L \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(L - m_L)^2}{2\sigma_L^2}\right], \quad (2)$$

де $\sigma_L = \sqrt{\sum q_0(L_i) \cdot (L_i - m_L)^2} = \pm 1,2$ км – середнє квадратичне відхилення від середнього значення; $m_L = \sum q_0(L_i) \cdot L_i = 4,098$ км – середня глибина залягання початкових запасів і ресурсів.

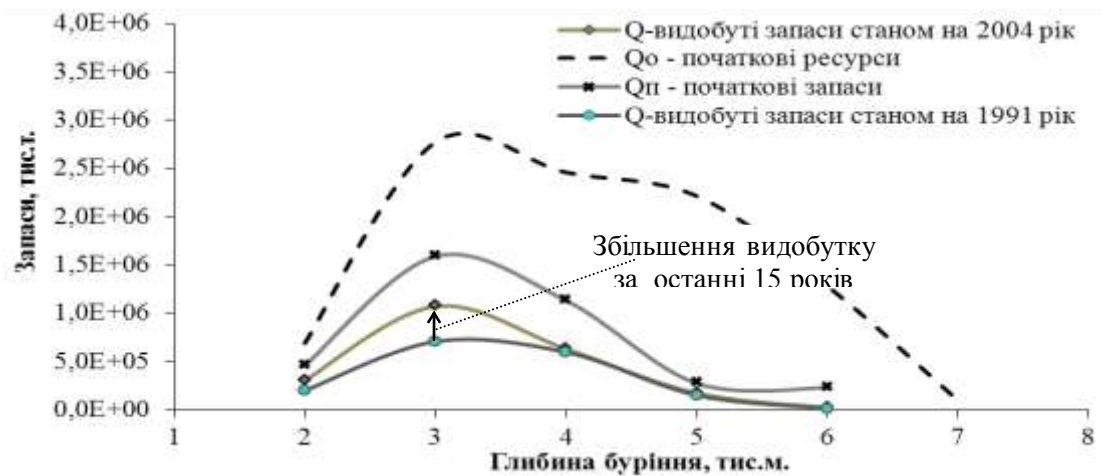


Рис. 2. Характеристики розподілу запасів і ресурсів вуглеводнів в Україні за глибиною залягання продуктивних горизонтів:

Q – видобуті запаси ВВР станом на 2004 рік та станом на 1991 рік; Q_0 – початкові ресурси; $Q_n = \text{видобуті} + A + B + C1$ – початкові запаси ВВВ

Модель (2) – геологічна модель розподілу ВВР за глибиною їх залягання враховує як видобувні запаси, так і ресурси ВВР, які будуть освоюватися на протязі більше 50 років, і є необхідною для розв'язання наступних задач:

1. формування парку бурових установок (БУ) за класами, що мають певну номінальну глибину буріння свердловин;
2. оцінки геотермальних ресурсів за глибинами буріння глибоких свердловин;
3. підвищення енергоефективності пошуково-розвідувального буріння і завершивши експлуатацію продуктивних горизонтів експлуатаційних свердловин шляхом переводу глибоких свердловин у геотермальний фонд.

Розподіл ВВР визначає структуру парку бурових установок. На рис. 3 наведені фактична структура парку БУ, фактична характеристика $q_0(L)$ і модельна характеристика $F = q_{0m}(L)$ розподілу ВВР.

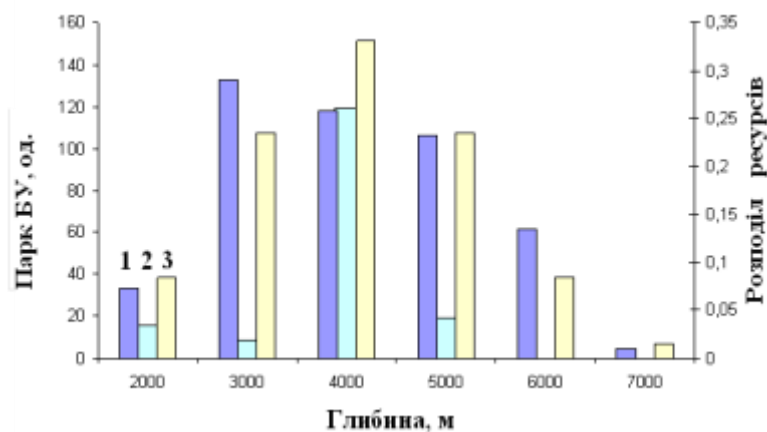


Рис. 3. Характеристики розподілу ресурсів

(фактичні – 1 і модельні – 2) та фактичний парк БУ – 3 в залежності від глибини залягання продуктивних горизонтів для середньої глибини 4 км

Геологічна інформація про успішність ГРР і розподіл ВВР за глибинами має певний вимір, що визначається коефіцієнтом успішності пошуково-розвідувального буріння свердловин.

Так, у табл. 4 наведені результати буріння свердловин у системі Національної акціонерної компанії “НАК “Нафтогаз України” (далі нафтогазова компанія України – НГКУ). (див. Додаток Б)

З наведених даних у табл. 4 видно, що коефіцієнт успішності коливається від 0,46 до 0,63, а глибина пустих свердловин сягає більше 3000 м. При середній вартості буріння 7500 тис. грн./м вартість пустих свердловин складає

$$\Delta C = 7500 \cdot (16 \cdot 3000 + 7 \cdot 4000 + 5 \cdot 5000 + 2 \cdot 6000) = 735 \text{ млн. грн./рік.}$$

На рис. 4 наведені сумісні характеристики розвіданих запасів, початкових ресурсів, видобутих запасів, загальна кількість і кількість продуктивних свердловин за глибинами залягання продуктивних горизонтів. (див. Додаток Б)

Проблема пустих свердловин є результат недосконалості інформаційних геофізичних технологій пошуку ВВР, а саме, точних методів пошуку, до яких належить сейсмозв'язка.

Вирішення проблеми з пустими свердловинами в аспекті геотермальних ресурсів вимагає інформацію про кількість теплової енергії, яку можна

видобувати з пустої свердловини, розподіл геотермальних ресурсів на території України.

Вирішення проблеми з пустими свердловинами в аспекті геотермальних ресурсів вимагає інформацію про кількість теплової енергії, яку можна видобувати з пустої свердловини, розподіл геотермальних ресурсів на території України.

Дослідження обох питань показали наступне.

Теплова енергія Землі, як зазначено у [13], є геоенергетичним ресурсом. Геоенергетичні ресурси України на проектних глибинах характеризують теплофізичні параметри Землі, а саме, температури і густини теплового потоку (ГТП), що наведені на рис. 5 а, б. На рис. 5в наведена карта розподілу ВВР.(див.Додаток В)

На підставі даних про ГТП у роботі [13] побудовані карти густини геоенергетичних ресурсів у тоннах умовного палива на один квадратний метр, які можуть бути видобуті водною геоциркуляційною системою з температурою носія не нижче ніж $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ та його поверненням у надра з $T \sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Загальні геоенергетичні ресурси України (визначені на даний час) приблизно у 20 разів перевищують усі запаси горючих копалин на її території. На деяких площах вони досягають 10 т у.п./м^2 (у.п. – умовне паливо), що перевищує запаси енергії, які можуть бути видобуті з великого родовища нафти чи газу. Геоенергетичні ресурси, що придатні для практичного використання шляхом одержання пари (електричної енергії) без додаткового нагрівання, розвідані у Закарпатті та на обмежених територіях у Криму.

З огляду карти видно, що найбільш перспективними для розвитку геотермальної енергетики в Україні є східний регіон, Крим і західний регіон території країни, як і освоєння ВВР.

Фізичні можливості генерації теплової енергії геологічним середовищем (ГС) в межах території України оцінюються з використанням інформації про розподіл теплофізичних параметрів ГС, що, наведені на рис. 5,

термокаротажних даних та даних досліджень температурних режимів у пробурених свердловинах.

Так, у [13] зазначено наступне: Густина теплового потоку – це кількість тепла, що виноситься з надр на поверхню за одиницю часу на одиницю площі. Вона вимірюється у мВт/м^2 і визначається як результат множення геотермічного градієнта у певному інтервалі глибин на теплопровідність порід цього інтервалу. На території України густина теплового потоку змінюється від 25-30 мВт/м^2 до 100-110 мВт/м^2 . Температури на глибині 1 км змінюються від 20 до 70 $^{\circ}\text{C}$, а на глибині 3 км – від 40 до 135 $^{\circ}\text{C}$. Розподіл теплових потоків тісно пов'язаний з особливостями геологічного розвитку регіонів та їх тектонікою. Глибинний тепловий потік (ГлТП) визначається як спостережений тепловий потік, відкоригований з урахуванням численних близьких до поверхні впливів: палеоклімату, руху підземних вод із вертикальною складовою, геологічних структур, що зумовлюють негоризонтальне залягання поверхонь розділу порід із різною теплопровідністю, молодих насувів, накопичення молодих осадових відкладів тощо. Карта ГлТП показує розподіл його фонових (35-50 мВт/м^2) і аномальних (60-130 мВт/м^2) величин на території України.

В роботі [14] наведений тепловий баланс Землі за даними середніх річних значень теплових потоків. Так, тепловий баланс Землі складається з короткохвильової радіації (КХвР: 0,1-4 мкм), що надходить на поверхню атмосфери від Сонця на рівні $\eta_c = 336 \text{ Вт/м}^2$, частина якої відзеркалюється у космічний простір на рівні $\eta_{c-k} = 100 \text{ Вт/м}^2$, а в кількості $\eta_{c-3} = 157 \text{ Вт/м}^2$ поглинається земною поверхнею і в кількості $\eta_{c-a} = 79 \text{ Вт/м}^2$ поглинається атмосферою, а також з довгохвильової радіації (ДХвР: 3-45 мкм), що випромінюється поверхнею Землі на рівні $j_3 = 392 \text{ Вт/м}^2$. Тобто, поверхня Землі випромінює власне тепло на рівні $j_{30} = 235 \text{ Вт/м}^2$. А оскільки, тепловий потік ДХвР від Землі у космічний простір дорівнює 235 Вт/м^2 , то сумарний тепловий баланс Землі характеризується термодинамічною рівновагою між потоком зовнішнього тепла і випромінюванням власного тепла, находячись у

космічному просторі, тобто Земля є джерелом теплової енергії. Тоді визначений тепловий потік j_{30} повинен спостерігатися і на глибинах 3000 м, але визначені теплові потоки на цих глибинах, що наведені на рис. 5, значно менші даного значення. Виникає питання про походження температур на даних глибинах.

Виконані експериментальні дослідження у свердловинах з глибинами більше 3000 м в Україні і за кордоном [15] з оцінки генерації геотермальними зонами з нормальними і підвищеними температурними градієнтами теплової енергії, показали, що теплові потоки є на чотири порядки більшими.

Так, з досвіду буріння свердловин у регіонах з нормальною геотермальною активністю відомо, що глинистий буровий розчин (б/р) на водній основі густиною $\rho_p = 1500 \text{ кг/м}^3$ у процесі циркуляції з продуктивністю $w = 0,02 \text{ м}^3/\text{с}$ під час промивання свердловини виходить на поверхню нагрітим до температури, яка коливається в межах $T_{вх} = 30 \div 60^\circ\text{C}$, а на вибої $L = 3500 \text{ м}$ з температурним градієнтом $0,028^\circ\text{C/м}$ б/р, рухаючись у бурильних трубах, нагрівається до температури $T_{виб} = 100^\circ\text{C}$ при вхідній температурі $T_{вх} = 18^\circ\text{C}$. Ці факти дозволяють оцінити середню щільність теплового потоку від стінок бурильної колони (БК) до б/р масою $m = 30 \text{ кг}$, що рухається у БК від устя до вибою, за наступною формулою

$$n_p = \frac{\Delta U_p}{t_{\delta m} \cdot S_{\delta m}} = c_p \rho_p \frac{d}{4} \cdot \Delta T \cdot \frac{V}{L}, \quad (3)$$

де $\Delta U_p = mc_p \Delta T$ – зміна внутрішньої енергії б/р від устя до вибою, Дж;
 $S_{\delta m} = \pi d V t_0$ – площа внутрішніх стінок БТ, що нагріває б/р, м^2 ; $t_0 = 1$ – одиниця часу, с; $t_{\delta m} = L/V$ – час руху б/р у БТ від устя до вибою, с; $V = w/s_{\delta m}$ – швидкість руху б/р у БК, м/с; $s_{\delta m} = \pi d^2/4$ – площа перетину БТ, м^2 ; $c_p = 2190$ – питома теплоємність б/р, Дж/кг $\cdot^\circ\text{C}$; $\Delta T = T_{виб} - T_{вх}$ – температура нагрівання б/р, $^\circ\text{C}$;
 $m = \rho_p w \cdot t_0$ – маса б/р, що рухається від устя до вибою, кг; $d = 0,12$ – внутрішній діаметр БТ, м.

За формулою (3) щільність теплового потоку дорівнює

$$n_{p1} = 2190 \cdot 1500 \cdot \frac{0.12}{4} \cdot (100 - 18) \cdot \frac{1,77}{3500} = 4,1 \text{ кВт/м}^2,$$

а за визначенням [13] густина теплового потоку на вибої

$$\tilde{n}_{p1} = \frac{T_{виб} - T_{ex}}{L} \cdot \lambda = \frac{100 - 18}{3500} \cdot 2,5 = 0,059 \text{ Вт/м}^2,$$

де $\lambda = 2,5$ – теплопровідність ГС, Вт/м·°С.

Внутрішня енергія на виході з БК на вибої дорівнює

$$\Delta U_p = 2190 \cdot 30 \cdot [100 - 18] = 5,4 \cdot 10^6 \text{ Дж.}$$

А оскільки дана енергія видається б/р з БК кожену секунду, то загальна потужність теплового потоку від ГС до всього б/р, що знаходиться у просторі БК у кількості 40 м³ (масою 60000 кг) складає 5,4 МВт.

На рис. 6 наведена фактична ситуація дії геотермального фактору з температурним градієнтом 0,04 °С/м під час буріння свердловини № 10 Сентянівської площі, де температура на вибої сягає 140 °С. (див. Додаток Г)

Фактично дія геотермального фактору на б/р моделюється структурною схемою, що наведена на рис. 1.5, яка показує: по перше – ГС генерує значну кількість теплової енергії, що визначається у МВт; по друге – дана кількість тепла не пояснюється відомими значеннями щільності теплових потоків [13, 14]; по третє – шлях до підвищення енергетичної ефективності геологорозвідувальних робіт, а саме, використання пустих свердловин на нафту і газ як енергогенеруючих свердловин.

3. Розроблення математичної моделі і визначення енергетичних параметрів дії геотермального фактору на простір свердловини

Під час геофізичного дослідження глибоких свердловин на нафту і газ у різних куточках світу, зокрема, в Україні, спостерігається геотермальний фактор – зростання температури геологічного середовища (ГС) за глибиною свердловини, що визначається температурними градієнтами на рівні 0,02-0,05 °С/м, і на глибинах більших 3000 м гірські породи мають температури більші 100 °С. Так, на свердловині № 10 Сентянівської площі з глибини 4200 м

при тривалому бурінні буровий розчин виходив у кількості 22 л/с з температурою 51 °С при бурінні, а при промиванні свердловини 48 °С. На вибої в статичному режимі температура розчину сягала більше 140 °С (рис. 7), а на усті 14 °С. Конвективного теплообміну у б/р нема. (див. Додаток Г)

Про сталу дію геотермального фактору говорить той факт, що під час буріння свердловин одним долотом тривалий час (~ 700 годин) буровий розчин циркулює у свердловині з продуктивністю 25-20 л/с і виходить на поверхню з постійною температурою, яка з заглибленням свердловини збільшується (рис. 3 а).

Аналіз методів [13, 14, 16, 17, 18] розв'язку поставленої фізичної задачі показує, що задача розв'язується експериментальним шляхом. Так, АР Крим с. Медведівка і с. Янтарна побудовано кілька теплових пунктів на геотермальних свердловинах глибиною 1900 м. Тепловий пункт біля с. Янтарне, має такі характеристики: дебіт геотермальної свердловини – 65 м³/год, температура води – 85 °С, її тиск – 1,2 МПа, а тепла потужність – 3 МВт. Використання геотермального тепла в Янтарному дає змогу опалювати 2 гектари теплиць і заощаджувати за сезон 1200 тис. м³ газу або 864 т дизельного палива.

Ідея використання геотермального фактору з пробурених нафтових і газових свердловин для задоволення потреб суспільства у тепловій енергії висловлена в роботі [19], але наведена авторами модель даного фактору не дає визначення реальної кількості теплової енергії, яка спостерігається у свердловині.

В роботі [20] задача моделювання геотермального фактору розв'язана з використанням рівняння, що описує процес розповсюдження тепла в суцільному середовищі виду

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_v T) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + F(x, y, z) \quad (4)$$

де ρ – густина; c_v – об'ємна теплоємність; T – температура; λ – теплопровідність; $F(x, y, z)$ – генерація тепла одиницею об'єму, t – час, у виді

$$\rho c_v \frac{\partial}{\partial t}(T) = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + F(z, t) \quad (5)$$

Розв'язок рівняння (5) має складності з початковими умовами. Так, при $T_0 = \text{const}$ $T = T_m - T_0$, розв'язок рівняння (5), для постійних ρ , c_v , λ знаходиться для початкових: $T(z, 0) = 0$ та граничних: $T(0, t) = 0$, $T(\infty, t) \neq \infty$ умов у виді

$$T(z, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int_0^t d\tau \int_0^\infty \frac{h}{\sqrt{t-\tau}} \cdot [e^{\theta_1} - e^{\theta_2}] \cdot F(\xi, \tau) d\xi, \quad (6)$$

де $\theta_1 = -\frac{(\xi - z)^2}{4h^2(t - \tau)}$, $\theta_2 = -\frac{(\xi + z)^2}{4h^2(t - \tau)}$, $h^2 = \frac{\lambda}{\rho c_v}$ – теплова функція.

Дослідження формули (6) показали, що для глибин менших 100 км температурний режим можна вважати стаціонарним, припускаючи, що $F(\xi, \tau)$ не залежить від часу. Похибки при даному припущенні складають одиниці процентів. Даний результат дозволяє зробити висновок, що до глибин 100 км рівняння (5) можна розглядати у виді

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -F(z, t), \quad (7)$$

Розв'язок даного рівняння не залежить від початкових умов.

Стосовно джерела теплової енергії в гірських породах, то в роботі [21] зазначено, що найбільша складність у визначенні інтегралу (6) пов'язана з визначенням функції $F(\xi, \tau)$ генерації тепла гірськими породами. Основним джерелом тепла у літосфері вважаються радіоактивні елементи.

Існуючі оцінки ГТР України наведені в [13]. В основу оцінки покладені щільності теплових потоків у літосфері на рівні 25-110 мВт/м².

В роботі [14] надана загальна оцінка середньої щільності власного теплового потоку Землі на рівні 235 Вт/м², що у $2 \cdot 10^4$ разів більше рівня 110 мВт/м².

Автор даної роботи зазначає, що обидва значення є експериментальними, але належать до різних фізичних процесів, а саме, до теплообміну і теплопровідності, відповідно. З метою врахування даних фізичних процесів і процесу теплопередачі тепла гірськими породами буровому розчину

розроблена і запропонована енергетична модель геотермального фактору (ЕМГФ) , яка визначає енергетичні параметри сталих теплообмінних потоків між б/р і гірськими породами під час його циркуляції у свердловині.

Математична постановка задачі.

Дано: $U_{вх}(t,0) \equiv U_{вих}(t,0) \equiv U_6(t,L) \equiv \Delta U_1(t,L) \equiv \Delta U_2(t,L) \equiv \Delta U_1'(t,L) \equiv \Delta U_2'(t,L) \equiv \text{const}$ Дж; $m(t) = \text{const}$, кг/с; $M_p(t,L) = \text{const}$, кг; $s_1 \equiv s_2 \equiv S_{онм}(L) \equiv S_{6м}(L) \equiv \text{const}$, м²; $c_p = \text{const}$, Дж/(кг·°С);

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1(0,0) = T_0 - \text{початкова температура б/р на вході у БТ}; \\ T_2(0,\infty) = T_m - \text{стаціонарна температура б/р на виході з ОТ}; \\ T_g(L,\infty) - \text{стаціонарна температура ГС на глибині } L. \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} M_0 \in [D_{онм}, d_{онм}, D_{6к}, d_{6м}, L] - \text{множина геометричних параметрів свердловини}; \\ M_p \in [\rho_p, c_p, V_{6м}, V_{ом}] - \text{множина теплофізичних параметрів б/р}; \\ M_g \in [L, T_g, \text{grad}(T_g)] - \text{множина геофізичних параметрів ГС}. \end{array} \right.$$

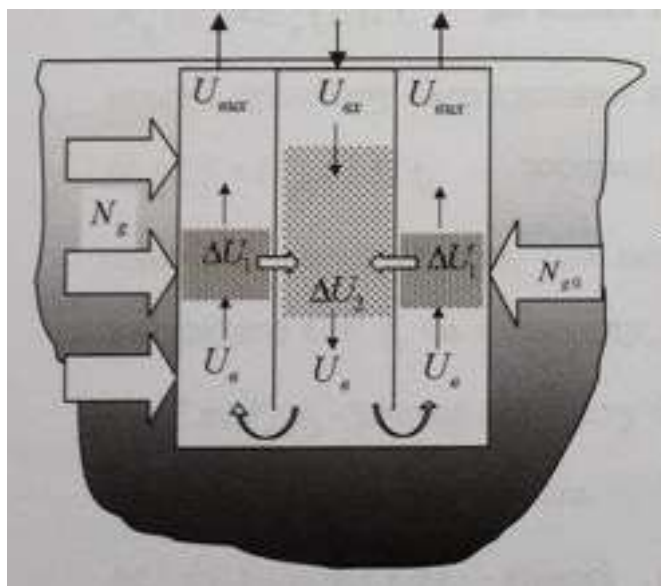


Рис. 8. Енергетична модель дії геотермального фактору у свердловині [22-24]

Система рівнянь енергетичного балансу стаціонарного теплообміну у свердловині:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{ex}(L) = U_{ex} + \Delta U_2(L) \\ U_{вих} = U_{ex}(L) + \Delta U_1(L) \\ U_{g0}(L) = [U_{вих} - U_{ex}] + \Delta U_2'(L) + \Delta U_1'(L) \\ N_0(L) = n_g(L)s_1 = \eta_1(L)s_1 = \eta_2(L)s_2 \\ N_g(L) = n_g(L)S_{om}(L) \end{array} \right. \quad (3.5)$$

де перше рівняння – моделює нагрівання б/р масою m , що рухається від устя до вибою у БТ;

друге рівняння – нагрівання б/р масою m , що рухається від вибою до устя в ОТ;

третє рівняння – моделює теплову енергію ГС, що складається з енергії, яка подається на земну поверхню, теплової енергії у просторі ОТ і теплової енергії у просторі БТ, відповідно, свердловини, заданої конструкції;

четверте рівняння – моделює потужність частки теплового потоку, що генерує ГС до свердловини, зокрема до б/р масою m у просторі ОК і БК;

п'яте рівняння – загальна потужність теплової енергії, що генерує ГС у свердловину заданої глибини;

U_{ex} – внутрішня енергія б/р масою m на вході у БТ, Дж;

$U_{вих}$ – внутрішня енергія б/р масою m на виході ОТ, Дж;

$U_{ex}(L) = c_p m T_m$ – внутрішня теплова енергія б/р на вибої, Дж;

T_m – температура б/р на вибої, Дж;

$U_{g0}(L) = \eta_g(L)[t_1(L) + t_2(L)]s_1$ – теплова енергія, віддана ГС за $t_0 = 1$ с у простір свердловини для нагрівання б/р масою m у просторах труб ОК і БК, Дж, (прийнято $\eta_g = \eta_1 \equiv \eta_2 = const$ – стабільні в часі середні значення щільності теплових потоків, що фактично змінюються за глибиною свердловини, запис (L) опущена);

$N_g(L) = U_g(L)/t_0$ – загальна потужність передачі теплової енергії від ГС до всього простору свердловини крізь всю поверхню ОТ за 1 секунду, Вт;

$N_0(L) = U_{g0}(L)/t_0$ – зосереджена потужність теплової енергії від ГС до простору свердловини, що поглинається б/р масою m в процесі контакту з поверхнею ОТ s_1 , за 1 секунду, Вт;

$s_1 = 2\pi r_1 V_{\text{ом}} t_0$ – площа контакту б/р масою m у БТ з середнім радіусом r_1 , Вт;
 $s_2 = 2\pi r_2 V_{\text{ом}} t_0$ – площа контакту б/р масою m у ОТ з середнім радіусом r_2 , Вт;
 $\Delta U_2(L) = \eta_2 t_2(L) s_2$ – енергія нагрівання б/р масою m у просторі БТ, Дж;
 $\eta_g = \eta_1, \eta_2$ – щільності теплових потоків ГС, стінок ОТ і БТ, відповідно, Вт/м²;
 $\Delta U_1(L) = \Delta U_1'(L) + \Delta U_2'(L) = \eta_1 t_1(L) s_1 + \eta_2 t_2(L) s_2$ – загальна енергія нагрівання б/р масою m у просторі ОТ, що складається з енергії $\Delta U_1'(L)$ нагрівання б/р і переданої теплової енергії $\Delta U_2'(L)$ до БТ (енергія, що передана до верхніх гірських порід, складає 1/25 частину від даної енергії), відповідно (товщини стінок БТ і ОТ прийняті рівними 0), Дж.

Визначити: $\eta_g(L), N_g(L) = n_g(L) \cdot S_{\text{ом}}(L), T_m$.

Розв'язок задачі.

Введемо наступні позначення:

$$\begin{cases} U_{\text{в}}(L) = y, U_{\text{вх}} = a, U_{\text{вих}} = b \\ U_{\text{г0}} = \begin{cases} \eta_g = x_1 \\ [t_1(L) + t_2(L)] s_1 = C_0 \end{cases} = x_1 C_0 \end{cases} \quad \begin{cases} \Delta U_2 = \begin{cases} \eta_2 = x_2 \\ t_2(L) s_2 = C_2 \end{cases} = x_2 C_2 \\ \Delta U_1 = \begin{cases} \eta_1 = x_1 \\ t_1(L) s_1 = C_1 \\ t_1(L) s_2 = C_3 \end{cases} = x_1 C_1 + x_2 C_3 \end{cases}$$

(8)

де a, b – задані параметри початкових і граничних умов енергетичного стану енергоносія, C_0, C_1, C_2, C_3 – задані константи, що визначаються за даними t_1, t_2, s_1, s_2 , що наведені у табл. 5, які враховують: глибину і конструкцію свердловини, продуктивність бурового насоса.

Систему рівнянь (8) перепишемо у вигляді (див. Додаток Д)

$$\begin{cases} y = a + x_2 C_2 \\ b = y + x_1 C_1 + x_2 C_3 \\ x_1 C_0 = (b - a) + x_1 C_1 + x_2 C_3 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_2 (C_2 + C_3) = (b - a) - x_1 C_1 \\ x_1 = \frac{(b - a)}{C_0 - C_1} + x_2 \frac{C_3}{C_0 - C_1} \end{cases}$$

(9)

З системи рівнянь (9) визначаємо шукані параметри у виді

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 = (b-a) \frac{(C_2 + 2C_3)}{C_2C_0 + C_3C_0 - C_2C_1}; \\ N_g = (b-a) \frac{(C_2 + 2C_3)}{C_2C_0 + C_3C_0 - C_2C_1} S_{om} \end{array} \right. \quad (10)$$

або у вигляді $n_g = (U_{вих} - U_{вх}) \frac{(2t_1 + t_2)}{s_1(t_1^2 - t_2t_1 + t_2^2)}$, $N_g = (U_{вих} - U_{вх}) \frac{(2t_1 + t_2)}{s_1(t_1^2 - t_2t_1 + t_2^2)} S_{om}$, (11)

На основі технологічного процесу, технологічні параметри якого наведені у табл. 3.1, визначені наступні енергетичні параметри ЕМГФ:

середня щільність теплового потоку у свердловині

$$n_g = (3,57 - 1,37) \cdot \frac{(2 \cdot 3876 + 1799)}{0,695 \cdot (3876^2 - 3876 \cdot 1799 + 1799^2)} \cdot 10^6 = 2680 \frac{Вт}{м^2} \quad (11.1)$$

загальна потужність теплового потоку у свердловині

$$N_g = 2680 \cdot 2474 = 6,63 \text{ МВт}, \quad (11.2)$$

з якої 3,57 МВт виходить на устя, а 3,06 МВт сумарна потужність тепла, що циркулює у свердловині крізь стінки БТ між потоками б/р, що направлені униз і вверх, та крізь стінки ОТ між б/р, що тече у міжтрубному просторі уверх та верхніми гірськими породами.

При теплотворності природного газу 32,5 МДж/м³ результат рівняння (11.2) еквівалентний газовій свердловині з продуктивністю 17,625 тис. м³/доб. Останні дослідження геотермального фактору на св. № 2 Водянівської площі показали теплову потужність б/р на земній поверхні при продуктивності насосів 42 л/с більше 9,3 МВт, що еквівалентно газовій свердловині з продуктивністю 24,7 тис. м³/доб.

Розроблена ЕМГФ (8) надає рівняння (11), що визначають щільність і потужність теплового потоку геотермальної енергії у свердловині.

Дослідження ЕМГФ проведемо за даними спеціальних геотермальних досліджень, що були проведені у свердловині № 189 Карадаг [15], які наведені у табл. 6 і 7. (див. Додаток Е)

Максимальна щільність теплового потоку від гірських порід, що нагріває б/р масою m крізь стінки БТ, визначається за наступною формулою

$$n_p = \frac{\Delta U_{\bar{om}}}{t_2 \cdot S_{\bar{om}}} = c_p \cdot \rho_p \cdot \frac{d_{\bar{om}}}{4} \cdot \Delta T_{\bar{om}} \cdot \frac{V_{\bar{om}}}{L}, \quad (12)$$

де $\Delta U_{\bar{om}} = mc\Delta T_{\bar{om}}$ – отримана теплова енергія б/р масою m у БТ, Дж; $\Delta T_{\bar{om}} = T_{\bar{om}}$

– T_{ex} – температура нагрівання б/р масою $m = \rho_p \cdot \varpi = \rho_p \cdot \frac{\pi \cdot d_{\bar{om}}^2}{4} \cdot V_{\bar{om}} \cdot t_0$, що

рухається у БТ від устя до вибою під час промивання свердловини, $^{\circ}\text{C}$; $\omega = 0,02$

– продуктивність бурового насоса, $\text{м}^3/\text{с}$; $t_{\bar{om}} = L/V_{\bar{om}} = 3765/1,77 = 2127$ – час

руху (нагрівання) б/р у БТ, с; $S_{\bar{om}} = \pi d_{\bar{om}} V_{\bar{om}} t_0$ – площа контакту внутрішніх

стінок БТ з б/р масою m , м^2 .

$$n_p = 2190 \cdot 1500 \cdot \frac{0,12}{4} \cdot \frac{(70-18)}{3765} \cdot 1,77 = 2410 \text{ Вт/м}^2,$$

що близько до значення, визначеного за формулою (11).

Для середнього значення температури $0,5 \cdot \Delta T$ щільність $n_p = 1,2 \text{ кВт/м}^2$, а за визначенням [18] густина теплового потоку у ГС на вибої дорівнює

$$n_p = \frac{T_{\bar{ok}} - T_{ex}}{L} \cdot \lambda = \frac{70-18}{3765} \cdot 2,5 = 0,035 \text{ Вт/м}^2,$$

де $\lambda = 2,5 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{C}$ – теплопровідність ГС.

Накопичена теплова енергія б/р, що виходить з БТ на вибої, дорівнює

$$\Delta U_p = 2190 \cdot 30 \cdot [70-18] = 3,4 \text{ МДж},$$

а оскільки дана енергія виходить кожну секунду, то загальна потужність теплового потоку від ГС до всього б/р, що знаходиться у просторі БК у кількості 40 м^3 (масою $60\,000 \text{ кг}$), складає $3,4 \text{ МВт}$, що близько до значення

3,56 МВт в Сентянівській свердловині № 10. Тому, модель теплообмінів у свердловині дозволяє прогнозувати температуру б/р на вибої за формулою

$$T_{\bar{o}m} = T_{ex} + \frac{n_g S_{om} (t_{\bar{o}m} + t_{om})}{M_p c_p}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (12)$$

Так, для свердловини № 10 Сентянівської площі при температурі ГС на глибині 3500 м $T_g = L \cdot \alpha_g = 3500 \cdot 0,04 = 140 \text{ } ^\circ\text{C}$, б/р під час промивання свердловини нагрівається на вибої до температури

$$T_{\bar{o}m} = 18 + \frac{2600 \cdot 2474 \cdot (1799 + 3876_{om})}{172000 \cdot 2500} = 105,35 \text{ } ^\circ\text{C},$$

а у свердловині Карадаг № 189 на глибині 3765 м дорівнює $59,8 \text{ } ^\circ\text{C}$, що близько до експериментального показника $60 \text{ } ^\circ\text{C}$ у табл. 7.

Результати оцінки основних значень геотермальних енергетичних ресурсів: щільності теплового потоку і теплової потужності ГС за рівняннями (8) і (11), показують, що максимальна щільність теплового потоку складає 2680 Вт/м^2 .

Пояснення визначеному тепловому потоку на рівні $2,68 \text{ Вт/м}^2$ надає закон Стефана-Больцмана, який визначає випромінювання теплової енергії абсолютно чорним тілом за рівнянням $\eta = \sigma \varepsilon T^4$, Вт/м^2 , де $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2\text{К}^4)$ – постійна Стефана-Боліцмана, $\varepsilon = 1$ – коефіцієнт сірості абсолютно чорного тіла.

1) Так, для 1 м^2 земної поверхні випромінювання має значення 385 Вт/м^2 , що відповідає середній температурі $14,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ і збігається з результатами роботи [14].

2) Для градієнту $0,02 \text{ } ^\circ\text{C/м}$ щільність вертикального теплового потоку у ГС

$$\text{дорівнює } \eta = \varepsilon \sigma (T_L^4 - T_{L-1}^4) = 1 \cdot 5,67 \cdot 10^{-7} \cdot (273^4 - 273,02^4) = 92,28 \frac{\text{мВт}}{\text{м}^2},$$

що пояснює відомі його значення у [13], які визначені за рівнянням Фур'є.

3) На рис. 9 наведена теоретична характеристика потужності теплової енергії ГТФ, що діє в 1 м^3 ГС з градієнтом $0,04 \text{ } ^\circ\text{C/м}$ на б/р з градієнтом $0,03 \text{ } ^\circ\text{C/м}$ під час його циркуляції у свердловині № 10 Сентянівської площі визначеної за формулою

$$N_{g-p}(L) = \sigma \cdot \left[[T_{0g} + C_g(L)]^4 - [T_{0p} + C_p(L)]^4 \right] \cdot \varepsilon \cdot S_0, \text{ Вт} \quad (13)$$

де $T_{0g} = 273 + 14,2\text{К}$ – температура земної поверхні; $T_{0p} = 273 + 14,2\text{К}$ – початкова температура бурового розчину на земній поверхні; $C_g(L) = L \cdot \text{grad}(C_g)$, $C_p(L) = L \cdot \text{grad}(C_p)$ – температури гірських порід і бурового розчину на глибині z , $\text{grad}(C_g) = 0,04 \text{ } ^\circ\text{C/м}$, $\text{grad}(C_p) = 0,03 \text{ } ^\circ\text{C/м}$, $\varepsilon = \varepsilon_g = \varepsilon_p = 1$ – прийнятий коефіцієнт сірості гірських порід і бурового розчину; $S_0 = 6 \cdot s_0$, $s_0 = 1 \text{ м}^2$.

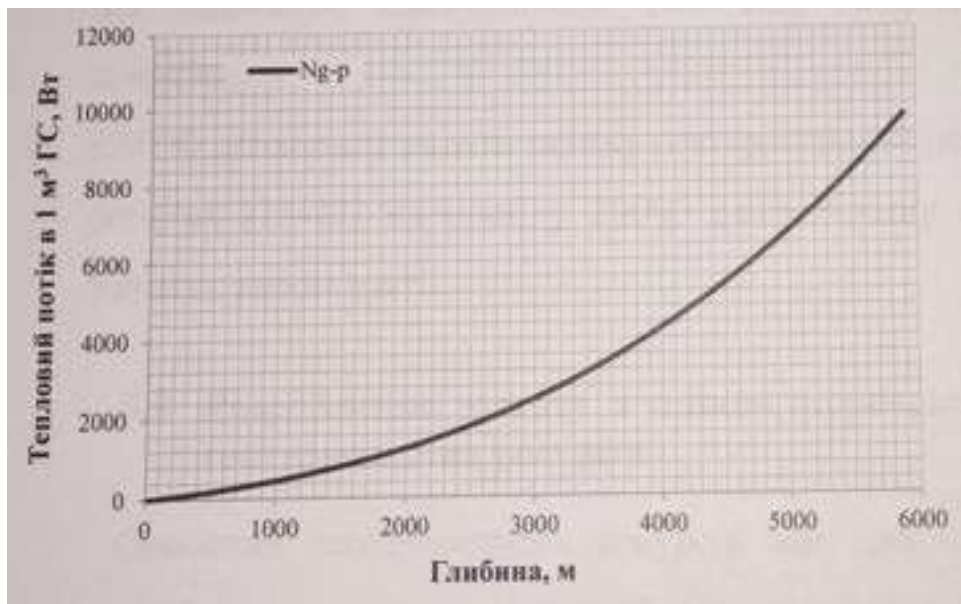


Рис. 9. Характеристика потужності геотермальної енергії в 1 м^3 простору св. № 10 Сентянівської площі

На глибині 3500 м потужність геотермальної енергії для різниці температур між ГС і б/р $35 \text{ } ^\circ\text{C}$ складає 3281,56 Вт, а для коефіцієнту сірості $\varepsilon = 0,8166$ (згідно роботи [19] коефіцієнт сірості натуральних матеріалів знаходиться в межах 0,7-0,9) $N_{g-p}(L) = 2679,7 \text{ Вт}$.

Виконані дослідження показали наступне:

1. Розроблена енергетична математична модель дії геотермального фактору у глибоких свердловинах дозволила визначити промислове значення теплової потужності ГТФ, яка, у порівнянні з середньою продуктивністю газової свердловини, є альтернативним еквівалентом теплотворності

природного газу, надає підставу для розвитку освоєння даних ресурсів, як самостійних, поряд з ресурсами ВВР.

2. Геотермальну свердловину слід розглядати, як “мікрохвильову піч” природного і технологічного походження з постійною потужністю до 15 МВт, в якій енергоносії перебуває достатній час для повної акумуляції тепла при досягненні вибою і втрачає частку тепла при досягненні устя. Задачі збереження і утилізації тепла, що акумулював і виніс на земну поверхню енергоносії при циркуляції у свердловині, є актуальними задачами у процесі освоєння ГТР.

3. Оскільки всі глибокі “сухі” і “обводнені” свердловини на нафту і газ мають геотермальний фактор, що еквівалентний за теплотворністю газовим свердловинам, то функцію “спішність” ГРР можна прогнозувати до значення 1, що підвищує ефективність ПО ПЕР відповідною продуктивністю ГТР свердловин.

4. ЕМГФ дозволила надати оцінку геотермальним ресурсам України, що наведена у роботах [32, 38, 39] на рівні у 20000 разів більшу, ніж всі теплотворні копалини України разом взяті.

4. Розроблення методу оцінки перспектив і ефективності освоєння геотермальних ресурсів

Освоєння геотермальних ресурсів має два напрямки розвитку. Перший – пов’язаний з готовою технічною базою, що існує в нафтогазовій галузі, а саме, бурові установки глибокого буріння та пусті свердловини глибиною більші 3000 м; другий – самостійний розвиток галузі, аналогічній нафтогазовій, що вимагає значних капіталовкладень. Тому, природно, освоєння ГТР необхідно починати у виробничій структурі нафтогазової галузі, оскільки галузь повністю готова для таких робіт, і які, до того ж, геологорозвідувальні роботи роблять повністю рентабельними, знижують їх ризики до нуля, а фонд експлуатаційних свердловин, що завершив розробку покладу нафти чи газу, або має не рентабельні дебіти газу, спрямовується на створення геотермальних енергетичних установок (ГТЕУ) шляхом облаштування свердловин

відповідним обладнанням. Також слід врахувати, що буріння глибоких свердловин може призводити до забруднення навколишнього природного середовища [22-24].

У даному підрозділі наведені результати досліджень з перспектив та технологій освоєння і використання ГТР з оцінкою промислових і економічних параметрів, що забезпечують енергетичну і екологічну незалежність і безпеку суспільству України.

Використання теплової енергії від ГТЕУ спрямовується:

- на обігрів приміщень житлово-комунального, промислового, сільськогосподарського призначення;
- на генерацію електричної енергії;
- на генерацію синтез-газу;
- на генерацію водню.

Основними роботами для створення ГТЕУ-з “закритого” типу є:

- спорудження свердловини;
- облаштування свердловини внутрішнім обладнанням;
- облаштування свердловини наземним обладнанням.

Основними роботами для створення ГТЕУ-в “відкритого” типу є:

- пошук геотермального покладу;
- спорудження не менше двох свердловин;
- облаштування свердловин внутрішнім обладнанням;
- облаштування свердловин наземним обладнанням.

Споруджування ГТЕУ має два етапи. Перший етап починається з землевідведення і підготовки ділянки для встановлення на ній бурової установки з необхідним комплектом обладнання в межах 1 га площі. Оскільки геотермальні свердловини на потужність більшу 5 МВт вимагають збільшення діаметрів для заданої глибини $L = 3000-4000$ м, то раціонально буде використати БУ вантажопідйомністю 300-500 тонн для буріння свердловин за конструкцією: (направлення – кондуктор – обсадна колона-експлуатаційна колона)

$$Напр. \left[\frac{0590}{0508} / L:25 \right] + Конд. \left[\frac{0540}{0478} / L:1000 \right] + ОК \left[\frac{0445}{0377} / L:3500 \right] + ЕК [0150 / L:3500].$$

Оскільки щорічні обсяги буріння геотермальних свердловин будуть дорівнювати, і навіть перевищувати фонд експлуатаційних газових свердловин, то виконана техніко-економічна оцінка процесу освоєння ГТР, у порівнянні з процесом освоєння покладів природного газу за 60 років ведення робіт при умові, що працює 50 шт. БУ, щорічні інвестиції у буріння складають 1 млрд. грн., щорічно буриться 50 свердловин з середньою продуктивністю теплової енергії 10 МВт або 25 тис. м³/добу природного газу. На рис. 10-11 наведені техніко-економічні характеристики обох процесів освоєння ПЕР (спорудження свердловин). (див. Додаток Є)

Аналіз характеристик освоєння ПЕР показує, що тепла енергія з ГТР-свердловин є у двічі дешевшою, видобуток у двічі більшим, а невичерпність і екологічна чистота ГТР є основним аргументом щодо перспективного використання даних природних ресурсів.

Використання теплової енергії від ГТЕУ для генерації електричної енергії має теж реальну соціально-економічну перспективу, незважаючи на малий ККД теплоелектричних елементів (3-5 % для температур до 120 °С і 6-8 % для температур до 250 °С), оскільки роботи з розроблення технічних і технологічних засобів утилізації ГТР нарощуються. Так, робота “СмС тензотерм Рус” зосереджена на створенні первинних напівпровідникових перетворювачів на основі сульфиду самарію (СмС), що підвищує ККД ТЕМ в 2-3 рази. Вже зараз цей показник наближається до 40-50 %. На рис. 12 наведені порівняльні характеристики ККД найкращого ТЕМ заснованого на ефекти Зеебека, ТЕМ Ві-Те і на основі властивостей СмС, значні поклади якого має Україна.

1. Аналіз існуючих ТЕМ показав, що реальний промисловий ККД ГТЕУ складає від 3 % до 5 % для температур 100 °С і до 20 % для бінарних установок, перспективний ККД ТЕМ становитиме біля 50 %.

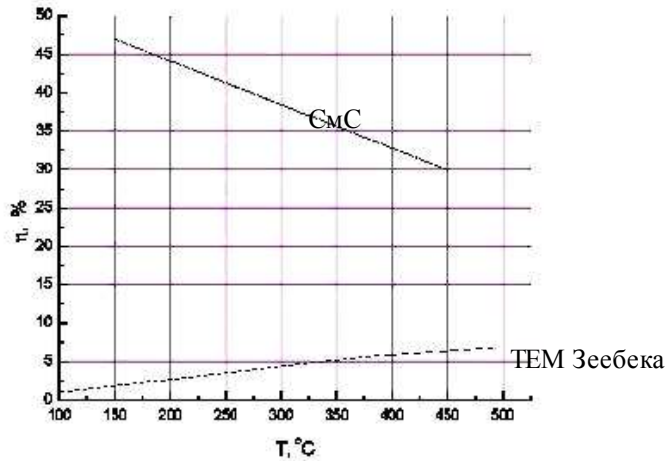


Рис. 12. Характеристики ККД в залежності від температури гарячої сторони для сучасних промислових ТЕМ (нижня характеристика) і ТЕМ на основі СМС

2. Електричні ГТЕУ можна використовувати як міні-піролізні плазмо-парові установки, що мають питомі електричні витрати ~ 3 кВт·год/кг і перетворюють (при температурі 1000-2000 °С) 90 % вугілля з теплотворністю до 28 МДж/кг (Україна видобуває 82 млн. тонн/рік вугілля) в синтез-газ (синтетичний метан) теплотворністю до 16 МДж/м³, виділяють 50 % теплової променевої енергії з зменшеним викидом шкідливих речовин у довкілля. Плазмотрон нагріває поверхні до температур більших 1000 °С, що реально підвищує ККД генерації електроенергії ТЕМ до 25-30%.

Оскільки будівництво нових житлових комплексів з автономним теплом будинків, басейнів, теплиць, передбачає буріння куца геотермальних свердловин, то після створення перших двох ГТЕУ потужністю до 10 МВт з сумарною електричною енергією 1 МВт (для сучасних ТЕМ з ККД 5 %), наступні свердловини будуть буритися з використанням електроенергії від ГТЕУ.

3. Окремим економічним рішенням використання ГТЕУ з електролізними установками є створення промислових технологій генерації водню. На сьогодні генерація 1 кг водню з теплотворністю 141 МДж/кг коштує 44 грн., де 40 грн. є витрати за електроенергію. З ГТЕУ ціна за 1 кг Н₂ коштуватиме 5 грн., що спів

ставимо з ціною за газ промисловим підприємствам 5000 грн. за 1000 м³, а за енергетичними показниками водень для нагрівання буде використовуватися у три рази менше. Тобто, з водневим джерелом підприємства будуть платити за теплову енергію в три рази менше проти витрат за споживання природного газу.

Воднева і плазмо-піролізна ГТЕУ дозволяють реалізовувати системи з підвищеним ККД, як показано на рис. 13. Найвищий показник ККД досягається у водневих ККД, в яких електроліз реалізується за патентами США С. Майєра (1 кВт витрат на 10 кВт водневої енергії). (див Додаток З)

Загальна економічна ефективність використання ГТЕУ наведена у табл. 8 (див Додаток Ж).

Для заміни природного газу: 1) в комунальних господарствах в обсязі 8,5-10 млрд. м³/рік, що витрачають генератори теплової енергії, які наведені у табл. 9, з якої 2,1 млрд. м³ втрачається на її транспортування до споживача; 2) в сільськогосподарських підприємствах в обсязі 29,95 млрд. м³/рік, необхідно щорічні загальні витрати грошей на суму 100 млрд. грн./рік, енергії біля 1,3-10¹⁸ Дж/рік, перекласти на ГТЕУ з наступними техніко-економічними параметрами.

Вартість (вибрана максимальна) ГТЕУ потужністю близько 5-10 МВт приймається 6-8 млн. дол. США. За рік дана ГТЕУ надасть теплової енергії на рівні $[5-10] \cdot 10^6 \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 365 = [1,57-3,15] \cdot 10^{14}$ Дж, що складе кількість геотермальних свердловин на рівні 4200-8400 шт., або у грошовому еквіваленті (8 грн./1 дол. США):

для глибин 3500 м: $[4200-8400] \cdot 8 \cdot 8 \cdot 10^6 = 270-540$ млрд. грн.

для глибин 3000 м: $[4200-8400] \cdot 6 \cdot 8 \cdot 10^6 = 200-400$ млрд. грн.

Враховуючи, що дані інвестиції вкладаються на 20-40 років роботи ГТЕУ, то економічна ефективність інвестицій складає біля 5-10 для 20 років і 10-20 для 40 років.

Висновки:

1. Вперше розроблена математична модель дії геотермального фактору, яка дозволила надати промислову оцінку щільності теплового потоку у глибоких свердловинах, що зростає за глибиною і на глибині 3500 м дорівнює 2680 Вт/м^2 , тобто $grad(\eta) = 0,765 \text{ Вт/м}^2/\text{м}$ у геотермально активній зоні на сході України з температурним градієнтом $a_g = grad(T_g) = 0,04 \text{ }^\circ\text{C/м}$, що відповідає загальній тепловій потужності гірських порід біля 10 МВт або газовій свердловині з дебітом біля 25 тис. $\text{м}^3/\text{добу}$.

2. Освоєння геотермальних ресурсів забезпечить всіх мешканців України, а також, тваринництво і рослинництво тепловою і електричною енергією в повному обсязі одноразовими витратами на створення ГТЕУ в обсязі 200-400 млрд. грн. проти існуючих щорічних витрат на тепло в обсязі 100 млрд. грн. Причому, кожна ГТЕУ з ККД біля 20 % після витрат на створення перших 3-х ГТЕУ стає рентабельною з “зеленим” тарифом за один рік, а при загальному тарифі за електроенергію – за три роки.

3. Освоєння ГТР надає нафтогазовому комплексу України додатковий видобуток ПЕР з “сухих” свердловин середньою кількістю 20 шт і середньою потужністю 5 МВт, що підвищують значення функції “успішність” ГТР з 0,39 до 1,0 і активізує щорічні витрати у розмірі 750 млн. грн./рік, в обсязі $(20 \text{ шт.}) \cdot (5 \text{ МВт}) \cdot (24 \text{ год}) \cdot (365 \text{ діб}) = 0,876 \cdot 10^6 \text{ МВт} \cdot \text{год}$, або 31,5 млн. м^3 природного газу.

4. Розроблена техніко-економічна оцінка ПО ГТР у порівнянні з освоєнням покладів природного газу показує, що собівартість теплової енергії від геотермальних ресурсів у двічі менша від собівартості теплової енергії при спалюванні природного газу, до того ж, не має витрат на ризики, забруднення середовища, відновлення експлуатації свердловини і ресурсу в цілому.

Висновки

Розроблено математичну модель дії геотермального фактору на простір свердловини, що дозволило визначити промислові енергетичні параметри теплових потоків у свердловині з боку гірських порід, отримати максимальне значення функції “успішності” моделі технологічного процесу освоєння ПЕР, а також, розвивати самостійний напрямок промислового освоєння ГТР з розв’язанням енергетичної і екологічної проблеми в Україні шляхом використання геотермальних, геотермоелектричних, геотермоелектроводневих енергетичних установок, що стосується завдань цивільного захисту.

В результаті виконання теоретичних та експериментальних досліджень у роботі отримані наступні наукові результати:

- Розроблена комплексна математична модель технологічного процесу освоєння ПЕР фондом свердловин, що включає виробничі функції “продуктивності” бурових установок, “успішності” ГРР, “розкриття” продуктивних горизонтів і дозволяє оцінювати енергоефективність і продуктивність процесу

Що до причин виникнення надзвичайної ситуації в задачах пошуку термоенергетичних носіїв..

- Вдосконалено математичний метод обробки даних гідродинамічного каротажу для визначення параметрів виробничої функції “розкриття” продуктивного горизонту моделі технологічного процесу освоєння ПЕР, а саме, гідродинамічних параметрів порід-колекторів в реальних умовах та пластового тиску флюїду, що дозволяє в автоматизованому режимі при контролі режимно-технологічних параметрів процесу буріння на земній поверхні визначати дані параметри і розкривати продуктивний пласт на рівновазі вибійного і пластового тисків з збереженням його фільтраційних властивостей та попереджувати, локалізувати надзвичайні ситуації.

- Розроблено математичну модель дії геотермального фактора на простір свердловини, що дозволяє визначати промислову продуктивність теплової

енергії свердловини з боку сухих гірських порід, отримати максимальне значення функції “успішності” моделі технологічного процесу освоєння ПЕР, а також розвивати самостійний напрямок промислового освоєння ГТР з розв’язанням енергетичної і екологічної проблеми в Україні шляхом використання геотермальних, геотермоелектричних, геотермоелектроводневих енергетичних установок та проводити моніторинг і прогнозування технологічних процесів ,які обумовлюють виникнення і розвиток надзвичайної ситуації.

- Розроблена інформаційно-функціональна комплексна математична модель системи оптимального управління процесом освоєння ПЕР фондом свердловин з параметрами функцій “успішності”, “продуктивності”, “розкриття” і економічними параметрами за критерієм максимальна сталість процесу, що дозволяє розробляти моделі процесів виникнення, розвитку, локалізації надзвичайних ситуацій, при використанні інноваційних технологій.

Список використаних джерел

1. Шустер Г. Детерминированный хаос: Введение / Г. Шустер. – М.: Мир, 1988. – Гл. 1, 5.
2. Афанасьева В.В. Проблема динамического хаоса в науке // Наука и культура. – Саратов, 2000. – С. 29-35.
3. Буланичев В.А. Самоорганизация экономических систем с детерминированным хаосом. Математическое моделирование / В.А. Буланичев, Л.А. Серков. – М, 2007. – С. 116-126.
4. Рабинович М.И. // Успехи физ. наук. – М., 1978. – Т. 125, № 1. – С. 123.
5. Андреев Ю.В., Дмитриев А.С., Куминов Д.А. Хаотические процессоры // Успехи современной радиоэлектроники. – М., 1997. – № 10. – С. 50-79.
6. Дмитриев А.С., Старков С.О. Передача сообщений с использованием хаоса и классическая теория информации // Успехи современной радиоэлектроники. – М., 1998. – № 11. – С. 4-30.
7. Абдуллаев А.В. Развитие идей В.И. Вернадского в моделировании устойчивого регионального развития // Материалы Международной научной конференции “Научные открытия Вернадского: Взгляд в будущее”. – Боровое (Казахстан), 30 мая-1 июня 2004. – М.: СГУ, 2004.
8. Попков Ю.В., Тюгашев Е.А. Глобальные проблемы и рефлексия цивилизаций // Тезисы докладов международного симпозиума “XXI век: диалог цивилизаций и устойчивое развитие”. – Улан-Удэ, 3-5 июля 2001 г. – Улан-Удэ: ВСГТУ, 2001.
9. Урсул А.Д. Стратегия перехода России на модель устойчивого развития: проблемы и перспективы / А.Д. Урсул, В.А. Лось. – М.: Луч, 1994.
10. .
11. Бойко Ю.А. Видобуток нафти, газового конденсату та природного газу / Ю.А. Бойко. – К.: НАК Нафтогаз України, ТОВ “Лабіринт”. 2004. – С. 16-21.
12. Гладун В.В. Напрямки, об’єкти і прогноз обсягів нафтогазопошукових і розвідувальних робіт в ДДЗ // Нафт. і газова промисловість. – 2006. – № 2. – С. 10-12.

13. Перспективи нафтогазоносності глибоко занурених горизонтів осадових басейнів України / Збірник наук. праць / Івано-Франківськ: Факел. 2005. – 219 с.
14. Національний Атлас України. – К.: ДНВП “Картографія”. 2007. – 440 с.
15. Физическая энциклопедия / Большая Российская энциклопедия. В 5-ти томах // под ред. А.М. Прохорова. Т.5. – М.: 1998. – 691 с.
16. Кулиев С.М. Температурный режим бурящихся скважин / С.М. Кулиев, Б.И. Есьман, Г.Г. Габузов. – М.: Недра, 1968. – 186 с.
17. Петрунин Г.И. Теплофизические свойства вещества Земли (часть 1) / Г.И. Петрунин, В.Г. Попов. – М.: Физический факультет МГУ, 2011. – 60 с.
18. Гордиенко В.В. Тепловое поле территории Украины / В.В. Гордиенко, И.В. Гордиенко, О.В. Завгородняя, О.В. Усенко. – Киев: Знание Украины, 2002. – 170 с.
19. Булатов А.И. Проектирование конструкций скважин / А.И. Булатов, Л.Б. Измайлов, О.А. Лебедев. – М.: Недра, 1979. – 280 с.
20. Термоэлектрический генератор (варианты) и способ изготовления термоэлектрического генератора / Каминский В.В., Голубков А.В., Казанин М.М., Павлов И.В., Соловьёв С.М., Шаренкова Н.В./ – Заявка на изобретение № 2005120519/28 от 22.06.2005, положительное решение от 16.06.2006.
21. Хиромаса Т. Кайбе, Икуто Аояма, Сейджироу Сано. Компания Комацу и её деятельность. Термоэлектричество. – № 1. – 2009. – С. 61-70.
22. Стародуб Ю.П., Карпенко В.М., Стасенко В.М., Нікорюк М.С., Карпенко О.В. Проект енергетичної безпеки України на основі власних геотермальних ресурсів. – Львів: Вісник ЛДУ БЖ., 2012. – № 6. – С. 107-117.
23. Карпенко В.М., Стародуб Ю.П. Дослідження факторів геотермальної енергії в глибоких свердловинах.. – Геодинаміка. – No 1(22) – 2017. – С.85-97.
24. Карпенко В.М., Стародуб Ю.П. Энергетический метод анализа теплообмена в глубокой скважине. .. – Buletinul Institutului de Geologie i Seismologie al ASM. – No 1. – 2017. P.5-18.