

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМІ «АВТОНОМНИЙ ТЕРМОБУР – РОЗПЛАВ – ПОРОДА»

Володимир Вашенко

доктор фізико-математичних наук, професор,

Міжвідомчий науковий центр фундаментальних досліджень з питань енергетики і екології,
Національний університет «Одеська політехніка», просп. Шевченка, 1, Одеса, Україна, 65044

Ірина Кордуба

кандидат технічних наук, доцент кафедри захисту навколишнього середовища та охорони праці

Київський національний університет будівництва і архітектури, просп. Повітрофлотський, 31,
Київ, Україна, 02000, uaror-korduba@ukr.net

Результати буріння глибинних свердловин у світі та в Україні показують, що традиційними буровими методами можна досягти максимальних глибин до 12,5 км. Було виявлено комплекс методичних і технологічних чинників, що обмежують більш глибоке проникнення в земні надра за допомогою традиційної бурової техніки. У роботі представлено результати фізико-математичного моделювання процесів, що реалізуються в геологічному просторі навколо автономного глибинного термобура. На основі даної моделі визначено швидкість вертикального гравітаційного занурення автономного термобура в надра землі й особливості теплофізичних процесів у системі «термобур – розплав – навколишня порода». Як джерело високотемпературного тепла для проплавлення земних порід у моделі використовуються теплові характеристики сучасних малогабаритних ядерних реакторів надповільного фронтального нейтронно-ядерного горіння, фізика активної зони яких виключає можливість ядерних аварій і катастроф. Метою роботи є моделювання теплофізичних процесів, що виникають під час проплавлення земних порід за допомогою автономного термобура в системі «термобур – розплав – навколишня порода», для обґрунтування можливості глибинного проникнення в надра Землі до 15 000 м і більше, а також для оцінки головних інженерних параметрів і особливостей процесів тепломасоперенесення в умовах контактного плавлення земних порід.

Отримано значення швидкості вертикального гравітаційного занурення автономного термобура, величини робочих температур на робочій поверхні термобура. Установлено, що застосування високотемпературних автономних термобурів як джерела високотемпературного тепла для глибинного автономного термобура дає можливість усунення всіх чинників обмеження для традиційного глибинного буріння та практичної реалізації принципу нових можливостей із використанням високої температури як головного робочого параметра. Представлена фізико-математична модель дозволяє визначити головні параметри, необхідні для розроблення технічних і технологічних пропозицій для концептуального проектування нового глибинного обладнання й інших термоплавильних пристроїв різного призначення, детально дослідити теплофізичні процеси, що виникають і протікають в області навколо термобура за його гравітаційного занурення у глибинні надра Землі.

Ключові слова: термобуріння, автономний високотемпературний термобур, фізико-математична модель, ядерний реактор, інженерно-фізична концепція.

Постановка проблеми. У роботі розглядаються теоретичні аспекти принципової можливості створення автономних ядерних глибинних термобурів для вирішення фундаментальних наукових і прикладних промислових завдань шляхом інноваційних геотехнічних методів і засобів розвідки глибинних корисних копалин.

Аналіз останніх досліджень. Результати експериментальних досліджень підтверджують можливість генерації вуглеводнів у мантийних умовах із їх подальшою міграцією із глибинних надр у товщі земної кори та з утворенням скупчень вуглеводневої сировини [1]. Для пояс-

нення походження таких покладів українськими вченими була створена концепція абіогенного походження вуглеводнів [2]. Глибини залягання вуглеводнів і прогнозовані запаси на семи нафтових і газонафтових родовищах у Мексиканській затоці (нафтові – Шенандоа, Тайбер, Нотті Хед, Покі, Діпуотер Харайзі, газонафтове – Каскіда, газоконденсатне – Блекберд Уест) такі: від 9 655 до 10 685 м, 2 377–4 432 млн т.

Україна також має значний потенціал з видобутку газу на глибинах понад 6 000 м. Упродовж 1968–1969 рр. видобуток газу в Україні зріс із 20 до 50 мільярдів кубометрів, сягнувши в 70-х рр.

65–70 мільярдів кубометрів. Це стало можливим саме завдяки освоєнню вуглеводневого потенціалу глибин в інтервалі 4,5–6,5 км.

У період 1969–2021 рр. в Україні було пробурено 5 глибинних свердловин. Криворізька надглибока свердловина була закладена з метою досягнення глибини 12 000 м, але реально вдалося пробурити лише 5 432 м. У результаті були отримані нові дані про будову, структуру та металогенію Криворізького залізорудного басейну, що дозволило створити багатофакторну модель структури та розвитку найбільшого у світі докембрійського залізорудного басейну [3]. Свердловина 3-Новосхідниця [4] допомогла відкрити Новосхідницьке нафтогазове родовище. У цій свердловині на глибині в 4 350 м дебіт нафти становив 300 т/добу. Сумарно на початок 2000 р. свердловина видала 730 тис. тон нафти і 284 млн м³ газу. У свердловині Шевченкове-1 була досягнуто глибина в 7 520 м за температури на вибої 185 °С, тиск – 135 МПа [5]. У свердловині № 1, уведеної в експлуатацію у 2020 р., на Кубашівській площі в Харківській обл., Енергосервісна компанія «ЕСКО-ПВНЧ» пробурила найглибшу свердловину [6], на її максимальній глибині 6 620 м було отримано приплив вуглеводнів більше 100 тис м³/добу. А на пошуковій свердловині на Семирнеківському родовищі в Полтавській області глибина в 6 750 м. За прогнозними оцінками, на цій глибині можна отримувати рекордні 100 тис м³/добу промислового газу [7].

Отже, результати буріння глибинних свердловин в Україні також підтвердили наявність глибинних покладів вуглеводнів. Окрім усього, результати буріння дали нові надзвичайно важливі дані для подальшого вдосконалення та розвитку технологій буріння.

Аналіз результатів глибинного буріння в Україні на нафтових і газових родовищах однозначно вказує на необхідність розвитку глибинного буріння. Україна має понад 100 розвіданих газоконденсатних родовищ. Зокрема, доведені запаси лише «традиційного» газу, за офіційними даними, сягають 600 мільярдів кубометрів. Проте розробляється менше 5% розвіданих родовищ. В Україні також підтверджено значні запаси природного газу на глибинах понад 6 км, відкриття великих нафтових родовищ в інтервалі глибин 8–11 км за високих стадій катагенезу, за високих температур і аномальних пластових тисків розширює глибинний інтервал існування рідких вуглеводнів, підвищує перспективи нафтоносності до глибин 10–12 км і змушує переглянути традиційні уяв-

лення про процеси нафтогазоутворення та нафтогазонакопичення на користь глибинного джерела нафти та газу в земній корі.

Для успішного буріння свердловин із глибиною понад 9 000 м потрібні найскладніші технологічні рішення, насамперед інноваційні підходи із застосуванням:

1) важких бурових установок вантажопідйомністю 900–1 000 т для досягнення глибин, більших за 9 000 м, з використанням складного комплексу додаткового бурового обладнання;

2) інноваційного інструменту для ефективного руйнування порід для максимальної швидкості проходки;

3) полегшених, надміцних і стійких до агресивних середовищ двостінних бурильних труб;

4) термостійких бурових розчинів на вуглеводневій або полімерній основі та хімічних реагентів для їх обробки;

5) систем автоматичного контролю за вертикальністю свердловин, здатних реалізувати ефективний контроль за мінімальним відхиленням кута під час буріння ділянок ствола з різними діаметрами;

6) замкнених циркуляційних систем, що дозволяють знизити ймовірність складних аварій під час проходження відкритих інтервалів у глибоких свердловинах і гарантують необхідну гідравлічну потужність, а також високий ступінь очищення розчину.

Через наявність усіх перелічених та інших факторів у різних країнах світу реалізація програм глибинного буріння розпочалася в умовах відсутності добре випробуваних на практиці технічних засобів, які доводилося вдосконалювати та навіть створювати заново на різних етапах буріння. У результаті запланований 15-км глибинний бар'єр не був досягнутий у жодній із країн світу. І подолати цей глибинний бар'єр навряд чи вдасться без створення нових проривних технологій.

Виклад основного матеріалу. Теоретичні розробки [8] та досвід глибинного буріння приводять до висновку про необхідність і неминучість створення в майбутньому принципово нової техніки у вигляді автономних глибинних засобів термобурів. Може йтися про термічне проплавлення порід автономними пристроями з потужними компактними ядерними теплогенераторами, створеними спеціально для роботи в умовах високих температур і тисків, на основі екологічно безпечних реакторів п'ятого покоління [11]. Висока температура втрачає свої обмежувальні

властивості та стає робочим параметром. Полегшуються також завдання інженерного вирішення проблеми високого гірського тиску застосуванням спеціальних міцних герметичних корпусів.

Загалом прикладне промислове застосування високих температур термобурів може бути несподівано різноманітним. Автономні промислові термобури можуть стати основою для створення нових геотехнологій видобутку корисних копалин, які не завдаватимуть екологічної шкоди навколишньому середовищу на поверхні Землі через відсутність гігантських породних і промислових шламових відходів. Зазначимо, що ідея застосування малих модульних ядерних реакторів для промислового видобування нафти у складних геологічних і географічних умовах не є новою [12; 13]. Нові глибинні промислові геотехнології з використанням малих ядерних реакторів – це принципово нова концепція видобутку корисних копалин. А перелік корисних копалин, які можна добувати геотехнічними методами, великий. Використанням ядерного реактора в надрах Землі як потужного високотемпературного теплогенератора можна забезпечити необхідний діапазон робочих температур і закачувати під Землю навіть холодні реагенти для їх нагрівання «на місці» до ефективних робочих температур. Для таких пристроїв висока температура стає робочим параметром і втрачає свої обмежувальні властивості.

Ідея автономного високотемпературного ядерного термобура [14; 15] та її концептуальні положення полягають в такому:

1) ядерні реактори є найпотужнішими та довгоживучими теплогенераторами, розігрітий ядерним теплом тугоплавкий корпус автономного термобура розплавить породу, що з ним контактує;

2) результати нових досліджень протягом останнього десятиліття показали можливість створення надзвичайно компактних і безпечних ядерних реакторів. За оцінками та розрахунками габаритних параметрів активної зони таких реакторів на торій-урановому паливі, вони можуть мати діаметр 12 см для активної зони у формі циліндра і 20 см – для сферичної активної зони [16–18];

3) під власною вагою такий термобур безперервно, під дією гравітації, занурюватиметься вглиб земних надр крізь розплавлені ним породи. А високотемпературне тепло буде генеруватися безпосередньо на торці свердловини, тим самим усувається необхідність у складному обладнанні для подачі електроенергії до торця свердловини та її подальшого перетворення на тепло;

4) як генератор високотемпературного ядерного тепла запропоновано ядерний реактор п'ятого покоління з активною зоною, у якій організовано надповільне фронтальне нейтронно-ядерне (хвильове) горіння ядерного палива. Особливості такого реактора такі: цілковите унеможливлення виникнення в ньому ядерних запроектованих аварій і катастроф; екологічна біосумісність; виключення жодних неконтрольованих аварійних ситуацій, унаслідок яких може виникнути радіоактивне забруднення поза межами реакторного залу; аварійні процеси в цьому реакторі гасяться не оператором, а автоматично, силою закладеного в нього фізичного закону.

Натепер є можливість створення безпечних ядерних реакторів, що працюють на найпоширенішому у природі та дешевому ізотопі ^{238}U . Фізична суть ядерно-екологічної безпеки реакторів «Покоління 5» у тому, що абсолютним захистом проти вибухового розвитку ядерної запроектованої аварії чи катастрофи є фізичний закон – не автоматика, не багатоступінчасті бар'єри безпеки, і навіть не оператор-людина, яка в системі управління ядерним об'єктом є найбільш слабкою ланкою, а непереборні закони фізики. Такі ядерні реактори, на відміну традиційних реакторів, не вимагають надкритичного завантаження ядерного палива, а отже, принципово не здатні вибухнути. У них також виключається участь оператора, а з ядерного паливного циклу вилучаються технологічні процеси збагачення ядерного палива. У їхніх активних зонах спалюється природний і навіть технічний U^{238} за відсутності системи регулювання реактивності реактора, а ступінь вигорання палива може досягати 5–70% і вище. А найбільш небезпечні для біосфери уламки поділу, що утворюються у процесі ядерних реакцій у реакторному паливі, як-от технецій, йод, цезій, цирконій тощо, трансмутують у самій активній зоні реактора. У результаті взаємодії з нейтронами вони перетворюються на біологічно безпечні ядра. Такі безпечні реактори можна використовувати в будь-яких важкодоступних місцях планети. Їх створення може позитивно вплинути на розвиток багатьох матеріальних і духовних цінностей у суспільстві, кардинально змінити технологічний стан і економіку майбутньої ядерної енергетики світу.

Опис методики. Фізико-математична модель системи «термозонд – розплав – порода».

Задача про вертикальний рух геозонда в гірських породах або у крижаних товщах унаслідок їх проплавлення зводиться до розгляду самоузго-

дженого процесу поширення тепла від поверхні корпусу термобура, через шар розплаву навколо нього, до твердої породи, для її прогрівання та плавлення. Також необхідно розглянути гідродинамічну задачу про вертикальне перетікання розплаву від лобової частини геозонда у протилежному руху до напрямку його вектора. Необхідність комплексного розгляду теплофізичної та гідродинамічної задач обґрунтовується наявністю загального параметра – швидкості руху геозонда як теплоджерела. Для створення математичної моделі, адекватної процесам тепломасоперенесення за контактного плавлення, використовувати систему рівнянь необхідно замкнути рівняннями поширення тепла в навколишній породі. Цю систему рівнянь можна вирішити шляхом уведення малого безрозмірного параметра, який визначається відношенням найменшої товщини шару розплаву до величини характерного розміру самого геозонда. Значення цього параметра можуть змінюватися в діапазоні величин від 10^{-3} до 10^{-4} . Далі методом чисельного комп'ютерного інтегрування можна отримати із задалегідь заданою точністю такі головні вихідні інженерно-фізичні параметри: швидкість руху геозонда, товщину шару розплаву навколо геозонда, поля швидкостей і температур розплаву та температуру нагріваючої поверхні термобура.

Теоретичні основи моделювання. Фізична структура досліджуваної системи (рис. 1): нагрівач із температурою робочої поверхні, що перевищує температуру плавлення навколишньої породи; масив породи, що плавиться навколо геозонда; рухомий шар розплаву, що здійснює теплову взаємодію елементів системи; гравітаційне вертикальне проникнення геозонда в надра.

Навколозондові процеси в системі «термозонд – розплав – порода». Вихідні положення:

1) тепла енергія робочої поверхні геозонда витрачається на перегрів шару розплаву та на прогрівання твердої породи до температури плавлення, а частина енергії поглинається у процесі фазового переходу;

2) область двофазної перехідної зони з шириною, яка обернено пропорційна потужному підводному до неї тепловому потоку, з великим ступенем точності можна вважати досить гладкою поверхнею;

3) процеси тепломасопереносу, що розглядаються в рухомій системі координат, пов'язаній з термозондом, можна вважати квазістаціонарними через малу товщину шару розплаву та швидко затухання температурних збурень у породі.

Технологія буріння крижаних порід зі зміною їхнього агрегатного стану була описана в зарубіжних працях, проте в них задачі автономного термобура не розглядались.

Розглянемо задачу про тепломасоперенесення в шарі розплаву й у твердій породі під час руху джерела тепла в полі земного тяжіння в результаті проплавлення навколишньої породи. Раніше вже розроблялися теорії точкового, лінійного та плоского джерел тепла, що рухаються у твердому тілі без зміни його агрегатного стану. Але завдання з урахуванням фазового переходу в середовищі для джерел тепла кінцевих розмірів довільної форми, що рухаються, раніше не розглядалося. Тому розглянемо систему «термозонд – розплав – порода», що складається з нагрівача з температурою робочої поверхні, що перевищує температуру плавлення навколишньої породи, і масиву, що плавиться (рис. 1).

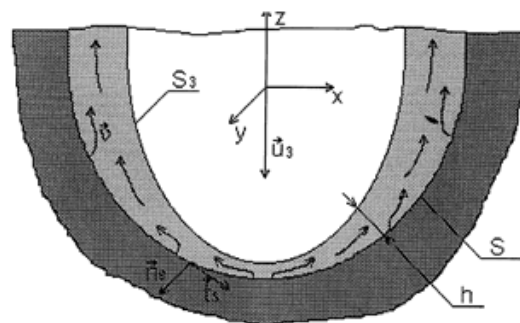


Рис. 1. Схематичне зображення системи «термобур – розплав – порода»: x, y, z – нерухома система координат, u_3 – швидкість і напрямок гравітаційного занурення термобура, S_3 – поверхня термобура, h – товщина шару розплавленої породи

Зазначимо, що в даній роботі термобуром називається автономний пристрій, що містить потужне термоджерело, за допомогою якого здійснюється розплавлення гірських порід. Теплова та механічна взаємодія елементів даної системи здійснюється через рухомий шар розплаву. Водночас занурення термозонда в надра вздовж гравітаційної вертикалі зумовлено силою його ваги. Теплова енергія, що виділяється з робочої поверхні термобура, витрачається на прогрівання твердої породи до температури її плавлення та на перегрів шару розплаву. Частина цієї енергії поглинається у процесі фазового переходу.

Розглянемо процеси в навколозондовій області в обсязі, що необхідний для визначення швидкості занурення термозонда й основних теплофі-

зичних характеристик системи «термозонд – розплав – порода».

Для аналізу досліджуваних теплофізичних процесів уведемо нерухому систему координат (x, y, z) (рис. 1), у якій уже за усталеного режиму термобур рухається рівномірно і впродовж осі z поки що невідомою швидкістю.

Далі введемо рухому, зв'язану з термобуром, систему координат (x, y, z) . Перехід до рухомої координатної системи здійснюється за допомогою таких перетворень:

$$\vec{u}_z = -u\vec{e}_z. \quad (1)$$

$$\begin{cases} x_0 = x, & y_0 = y, & z_0 = z, & t_0 = t \\ \vec{\nabla}_0 = \vec{\nabla}, & \frac{\partial}{\partial t_0} \rightarrow \frac{\partial}{\partial t} + u\frac{\partial}{\partial z} \end{cases}. \quad (2)$$

Так, задача для рухомого термобура зводиться до задачі з нерухомим у координатній системі (x, y, z) джерелом високотемпературного тепла, щодо якого порода рухається з постійною швидкістю:

$$\vec{u} = u\vec{e}_z = -\vec{u}_z, \quad (3)$$

а розплавлена маса породи обтікає його зі швидкістю \vec{v} . Створення математичної моделі системи «термобур – розплав – порода» стає можливим за таких обмежень:

1) зовнішню поверхню двофазної перехідної зони, ширина якої обернено пропорційна потужності нагрівачаючого її теплового потоку, з великим ступенем точності можна вважати досить гладкою поверхнею;

2) процеси тепломасопереносу, що розглядаються в рухомій системі координат, зв'язаній із термобуром, можна вважати квазістаціонарними через малу товщину шару розплавленої породи та швидке затухання температурних збурень в навколишній твердій породі.

Прийняття постулату про квазістаціонарність дозволяє прийняти те, що шар розплавленої породи має постійну форму та постійні розміри, а граничні значення для поля швидкостей розплаву та для температурних полів у розплавленому шарі, як і в самій твердій породі, не змінюються із часом. За таких уведених обмежень задача про рух термобура під дією сили тяжіння у твердих породах у результаті їх проплавлення зводиться до дослідження процесу поширення тепла від термобура через шар розплаву до твердої породи для її прогрівання з наступним її розплавленням та до гідродинамічної задачі про перетікання розплаву від лобової частини термо-

бура в напрямку, протилежному його руху. Водночас необхідність розгляду сукупності теплофізичного та гідродинамічного аспектів задачі зумовлюється наявністю такого загального параметра, як швидкість руху термобура. Самоузгодженість цих процесів дає можливість прийняти умову про те, що швидкість термопроникнення дорівнює швидкості переміщення поверхні фазового переходу, тобто швидкості проплавлення твердої породи.

Тепер можемо побудувати фізико-математичну модель, яка є адекватною процесам у просторі навколо термобура. Варто зауважити, що значення величин, що стосуються термобура, будуть мати індекс « z », а розплавленого шару – « p », твердої навколишньої породи – без індексу. Тоді тепломасоперенос у розплавленому шарі можна описати системою стаціонарних диференціальних рівнянь руху рідини Нав'є – Стокса (4), до якої потрібно додати рівняння нерозривності (5), а також рівняння поширення тепла (6):

$$\rho_p (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} = -\vec{\nabla} P + \rho_p \vec{g} + \eta \Delta \vec{v}, \quad (4)$$

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0, \quad (5)$$

$$\rho_p c_p (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) T_p = \operatorname{div} (\lambda_p \vec{\nabla} T_p) + \frac{\eta}{2} \sum_{i,k} \left(\frac{\partial v^{(i)}}{\partial x_k} + \frac{\partial v^{(k)}}{\partial x_i} \right)^2, \quad (6)$$

де ρ_p – щільність розплавленої породи, c_p – питома теплоємність розплавленої породи, λ_p – теплопровідність розплавленої породи, P – тиск у розплавленому шарі породи, η – коефіцієнт динамічної в'язкості розплавленої породи, \vec{g} – гравітаційне прискорення, \vec{v} – поле швидкостей розплавленої породи, T_p – поле температур у шарі розплавленої породи.

За умови нестисності розплаву породи рівняння його стану можна записати у вигляді (7), а далі замкнемо систему рівнянь (4) – (7), що описують процеси тепломасоперенесення в шарі розплаву, рівняння поширення тепла в породі, яке з урахуванням того, що рухоме тверде серцевище має швидкість, набуває вигляду (8):

$$\rho_p = \text{const}. \quad (7)$$

$$\rho c (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) T = \lambda \Delta T, \quad (8)$$

де ρ – щільність породи, c – питома теплоємність породи, λ – теплопровідність породи, T – поле температур у породі.

Зважаючи на те, що швидкість руху породи має тільки z -компоненту, рівняння (8) набуває

вигляду (9), а граничні умови для системи рівнянь (4) – (8) на робочій поверхні термобура S_s мають вигляд (10):

$$\rho c u \frac{\partial T}{\partial z} = \lambda \Delta T. \quad (9)$$

$$\begin{cases} T_p(\vec{r}_c) = T_0(\vec{r}_c), \\ \frac{\partial T_p}{\partial n_c}(\vec{r}_c) = -\frac{1}{\lambda_p} J_{n_c}^0(\vec{r}_c), \\ \vec{v}(\vec{r}_c) = 0, \end{cases} \quad (10)$$

де \vec{r}_c – радіус-вектор, який набуває множини значень на поверхні термозонда; \vec{n}_c – зовнішня щодо шару розплаву нормаль до робочої поверхні термозонда; $T_0(\vec{r}_c)$ – заданий розподіл температури на поверхні термозонда; $J_{n_c}^0(\vec{r}_c)$ – заданий розподіл густини теплового потоку на поверхні термозонда.

Тепер маємо зробити таке зауваження: розподіл температури та щільності теплового потоку на поверхні термозонда вважатимемо відомим, оскільки завдання про поширення тепла всередині твердого тіла кінцевих розмірів досить добре вивчене. Граничні умови для системи рівнянь (1.4) – (1.8) на поверхні фазового переходу S мають вигляд: $\rho_p v_{n_s} = \rho u_{n_s}$ – умови балансу маси; $v_{t_s} = u$ – умови прилипання; $T_p(\vec{r}_s) = T(\vec{r}_s) = T_\phi$ – умови t_s Стефана; $T_p(\vec{r}_s) = T(\vec{r}_s) = T_\phi$ – умова рівності температур. В умовах (11) індексами n_s , t_s позначені нормальна та тангенціальна складові частини векторної змінної; L – теплота фазового переходу; T_ϕ – температура плавлення породи.

Замкнемо сукупність граничних умов умовою рівності температури на нескінченності та незбудованої температури в породі T_n :

$$T(\vec{r}_\infty) = T_i. \quad (12)$$

Отже, система диференціальних рівнянь (4) – (8) із граничними умовами (10) – (12) і є математичною моделлю процесів тепломасопереносу в навколосондовій області. Вирішення цієї системи рівнянь дозволить вирішити будь-які параметри досліджуваних процесів. Отримати точне вирішення сформульованої задачі в загальній постановці неможливо, але для теоретичного й інженерно-технічного обґрунтування принципової можливості здійснення надглибинного термопроникнення – у чому й полягає наша мета, досить отримати наближене рішення. Основна проблема полягає в невизначеності, тобто в незданості в явному вигляді поверхні фазового переходу.

Як свідчать експериментальні дані й оціночні розрахунки, характерною особливістю термо-

проникнення є мала товщина шару розплаву в лобовій зоні [17]. Її відношення до характерних розмірів реально можливих автономних потужних джерел тепла є малою величиною порядку 10^{-5} – 10^{-3} . Така оцінка товщини шару розплаву дозволяє з точністю до величини даного порядку прийняти як поверхню фазового переходу робочу поверхню термозонда.

Отже, задача про поширення тепла в породі стає цілком визначеною і зводиться до класичної задачі про поширення тепла в напівобмеженому твердому тілі, яке має порожнину. За допомогою одного з різницевих методів можна отримати поле температур у породі, а також щільність теплового потоку на поверхні фазового переходу. Аналогічно можна діяти, якщо невідома температура робочої поверхні термозонда. З тією ж мірою точності за таку температуру можна прийняти відому температуру фазового переходу. Таке припущення робить певною задачу про поширення тепла всередині термозонда та дозволяє в першому наближенні отримати поле температур усередині термозонда та щільність вихідного теплового потоку. У результаті цих дій отримуємо цілком певне завдання про тепломасоперенесення в шарі розплаву. За допомогою методів наближених обчислень, які повинні вибиратися з урахуванням конкретного технічного завдання або планованого експерименту, можуть бути отримані будь-які теплофізичні параметри процесу контактного термопроникнення.

Результати фізико-математичного моделювання показали, що згасання теплових збурень у напрямку лобової поверхні автономного термобура становить лише кілька сантиметрів, а безрозмірна товщина шару розплаву дуже мала і має значення 10^{-5} – 10^{-6} , що забезпечує високу ефективність використання теплової енергії для проплавлення.

Виконана фізико-математична постановка задачі та розроблена відповідна модель для описання процесів тепломасопереносу в навколосондовій області для рухомого джерела тепла довільної форми дали можливість розв'язати задачу оптимізації процесу термопроникнення в товщах земних порід. Варто також відмітити, що в оптимізації процесу термобуріння значну роль відіграє форма теплоактивної робочої поверхні. Основними оцінюючими критеріями є швидкість опускання геозонда та коефіцієнт корисної дії (далі – ККД), що визначається як відношення мінімальної потужності, що витрачається на забезпечення вертикального руху

геозонда із заданою швидкістю, до всієї потужності, що знімається з робочої поверхні геозонда.

Верифікація даних, отриманих у результаті виконаного моделювання, була проведена шляхом її використання для розрахунків технологічної установки та технологічних процесів для реалізації термоконтактного плавлення низько-теплопровідних матеріалів. На цій теоретичній основі було створено діючий промисловий прототип установки «Термобат-4,5» в ІТТФ НАНУ, у якому було реалізовано принцип термоконтактного плавлення вазеліну [19] для потреб фармацевтичного виробництва.

Критерії вибору конструкційних матеріалів для практичної реалізації прототипу ядерного термобура. Для створення ядерного геозонда-термобура важлива наявність конструкційних матеріалів і комплектуючих для основних систем геозонда – корпусної оболонки та його лобової теплової «коронки». Необхідні матеріали повинні поєднувати високу міцність, хімічну стійкість, теплопровідність, термостійкість, задану електропровідність та інші властивості [20]. Сучасні конструкційні матеріали вже здатні забезпечити роботу ядерного термобура за температур до 1 600 °С і вище, тоді як температура плавлення більшості реальних магматичних гірських порід, що входять до складу земної кори, становить приблизно 1 100 °С. За таких температурних умов конструкція геозонда повинна витримувати високі тиски та мати високу хімічну та радіаційну стійкість. Для цього прийнятні матеріали з карбідної та нітридної кераміки. Нітридо-кремнієві матеріали належать до діелектриків, а карбідо-кремнієві – до напівпровідників. Окрім керамічних матеріалів, для створення лабораторних моделей геозондів і проведення з ними дослідницьких випробувань можуть використовуватися графітові матеріали. Будучи доступними та недорогими, вони поступаються кераміці лише за хімічною стійкістю та механічною міцністю.

Найбільш жорстка вимога до конструкційних матеріалів – це необхідність високої термохімічної стійкості оболонки та механічної міцності, з її збереженням за межею пружності під впливом високого тиску хімічно агресивних розплавів навколишньої породи. Використання ядерного теплогенератора накладає на всі елементи та вузли термобура додаткові вимоги щодо їхньої радіаційної стійкості та безпеки.

Результати досліджень. Описана в роботі фізико-математична модель є важливою для розуміння процесів, що відбуваються у просторі навколо автономного термобура під час локаль-

ного проплавлення магматичних гірських порід у земних надрах. Отримані модельні результати дають можливість провести попередній концептуальний аналіз можливості створення глибинного автономного термобура на базі наявних натеппер конструкційних матеріалів і комплектуючих.

Висновки. Термічне проплавлення порід автономними термобурами з потужними малогабаритними ядерними теплогенераторами, створеними спеціально для роботи в умовах високих температур і тисків. Водночас висока температура втрачає свої обмежувальні властивості та стає робочим параметром. Спрощуються також завдання інженерного вирішення проблеми високого гірського тиску.

Нові глибинні промислові геотехнології є принципово новою концепцією екологізації процесу глибинної розвідки земних надр із перспективною можливістю екологічно чистого доступу до невичерпних джерел геотермальної енергії з використанням різних видів і агрегатного стану енергоносіїв.

За допомогою представленої в роботі моделі визначено робочу температуру поверхні термобура для забезпечення процесу плавлення порід і швидкість вертикального гравітаційного занурення термобура в земні надра, а також особливості теплофізичних процесів у системі «термобур – розплав – навколишня порода». Отримані модельні значення швидкостей проникнення для земних гірських порід мають значення $(1,085-1,825) \times 10^{-4}$ м/с ($\approx 0,4-0,66$) м/годину) за 1 400–1 600 °С. Щільність теплового потоку через поверхню корпусу термобура в напрямку його вертикального гравітаційного руху в реальних гірських породах становить 1 МВт/м².

Для практичної реалізації демонстраційного автономного термобура прийнятні матеріали з карбідної та нітридної кераміки, здатні працювати в умовах тиску 7 000 бар і за температури 1 600 °С. Тугоплавкі метали та їх сплави та з'єднання з вуглецем, азотом, бором, кремнієм виключаються, оскільки що не відповідають критерію хімічної стійкості проти окислення. Нітридо-кремнієві матеріали, порівняно із кремнеземом і карбідною керамікою, міцніші, хімічно більш стійкі та широко використовуються в електротермічній техніці. Існує багато різновидів цих матеріалів і досить розвинена технологія їх виробництва й обробки. Для лабораторних моделей термобурів можуть використовуватися також доступні та недорогі графітові матеріали, які поступаються кераміці лише за хімічною стійкістю та механічною міцністю.

ЛІТЕРАТУРА

1. Лебідь В. Про особливості освоєння нового напрямку геологорозвідувальних робіт у Східному регіоні України. Стаття 2. Контури глибинної моделі. *Мінеральні ресурси України (МРУ)*. 2016. № 4. С. 39–46.
2. Якимчук М., Корчагін І. Нові свідчення на користь абіогенного генезису вуглеводнів за результатами апробації прямопошукових методів у різних регіонах світу. *Доповіді Національної академії наук України*. 2020. № 9. С. 53–60.
3. Глибинна будова земної кори в районі Криворізької структури за геолого-геофізичними даними і вплив техногенного чинника на прояв локальної сейсмічності / В. Кутас та ін. *Геофізичний журнал*. 2013. № 35 (3). С. 156–165.
4. Михалевич Л. Феноменальне досягнення з видобутку нафти пов'язане зі Східницею. Східницька громада : інтернет-видання. 27.04.2021.
5. Стефурак Р., Яремійчук Р. Історичні нариси буріння нафтових свердловин – від проекту до практики (Погляд з минулого у майбутнє). *Мінеральні ресурси України*. 2021. № 3. С. 24–27.
6. Енерго-сервісна компанія «ЕСКО-ПІВНІЧ» is under construction. URL Shortener – Short URLs & Custom Free Link Shortener. *Bitly*. URL: <https://bit.ly/3kN1Vch>
7. Burisma Group розпочала буріння свердловини проектною глибиною 6 200 м. *Полтавщина* : інтернет-видання. URL: <https://poltava.to/project/5135/> (дата звернення: 04.07.2023).
8. Kutcherov V., Krayushkin V. Deep-seated abiogenic origin of petroleum: from geological assessment to physical theory. *Reviews of Geophysics*. 2010. № 48 (1). RG1001.
9. More attention recommended for global deep reservoirs / В. Cao et al. *Oil & Gas Journal*. 2013. № 111 (9). P. 78–85.
10. Problemy razvedki netraditsionnykh istochnikov uglevodorodov v serpentinizirovannom sloe kontinentalnoi kory / V. Vashchenko et al. *Problemy ekologii i ekspluatatsii ob'ektov energetiki* : VIII konferentsia stran SNG. Kyiv, 1998. P. 68–70.
11. Fast traveling-wave reactor of the channel type / V. Rusov et al. *Міждисциплінарні дослідження складних систем*. 2017. № 9. P. 36–57. DOI: 10.31392/2307-4515/2017-9.3.
12. Ружинська Л., Кузьменко К. Математична модель теплообміну при перемішуванні мішалками з магнітним приводом. *Репозитарій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. URL: https://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/11110/1/vestnik_HPI_2011_10_Ruzhynska_Matematychna.pdf.
13. Економічна оцінка використання ядерної енергетичної установки для підвищення ефективності видобутку нафти в Україні. *Репозитарій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/637a7707-4923-4701-8406-ba4be34b56f8>.
14. Ващенко В. Вогнища глибокофокусних землетрусів : монографія. Київ, 1995.
15. Ващенко В., Писаренко Т. Про можливості контактного понадглибинного проникнення. *Вісник Київського університету. Серія «Фізико-математичні науки»*. 1995. № 1. С. 326–336.
16. Ультравільне ядерне горіння уран-плутонієвого розщеплюваного середовища на епітеплових нейтронах / А. Какаєв та ін. *Прогрес в ядерній енергетиці*. 2015. № 83. С. 105.
17. The temperature Kurdyumov's sharpening modes in the uranium-plutonium fission fuel of epithermal wavetravelling reactor / V. Tarasov et al. Abstract of 12-th Chaotic Modeling and Simulation International Conference (CHAOS 2019), Chania, Crete Greece. 2019. 19–22 June. 316.
18. Physical, technical and engineer concept of ultradeep nuclear geoprobes / V. Vaschenko et al. 2009. 13 (2). P. 77–83.
19. Оптимізація процесу термоконтактного плавлення матеріалів / Л. Грабов та ін. 2000. С. 94–99.
20. Vashchenko V., Pisarenko T. Проблеми вибору конструктивних матеріалів для понадглибинних термозондів. *Вісник Київського університету. Серія «Фізико-математичні науки»*. 1998. № 1. С. 318–330.

**SIMULATION OF THERMOPHYSICAL PROCESSES IN THE SYSTEM
“AUTONOMOUS THERMAL DRILL – MELT – ROCK”**

Volodymyr Vashchenko

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,
Interdepartmental Scientific Center for Fundamental Research on Energy and Ecology, Odessa Polytechnic National University, 1 Shevchenko ave., Odessa, Ukraine, 65044

Iryna Korduba,

PhD, Associate Professor at the Department of Environmental Protection Technology and Labor Protection

Kyiv National University of Construction and Architecture, 31 Povitroflotskyi ave., Kyiv, Ukraine, 02000, uaror-korduba@ukr.net

The results of drilling deep wells in the world and in Ukraine show those maximum depths of up to 12,5 km can be reached with traditional drilling methods. At the same time, a complex of methodical and technological factors limiting deeper penetration into the earth's interior using traditional drilling techniques was revealed. The paper presents the results of physical and mathematical modeling of the processes implemented in the geological space around the autonomous deep thermal drill. On the basis of this model, the speed of vertical gravitational immersion of an autonomous thermal drill into the earth's interior and the features of thermophysical processes in the "thermal drill – melt – surrounding rock" system were determined. As a source of high-temperature heat for melting the earth's rocks, the model uses the thermal characteristics of modern small-sized nuclear reactors of ultra-slow frontal neutron-nuclear combustion, the physics of the active zone of which excludes the possibility of nuclear accidents and catastrophes. The purpose of the work is to simulate the thermophysical processes that occur during the melting of earth rocks using an autonomous thermal drill in the "thermal drill – melt – surrounding rock" system to substantiate the possibility of deep penetration into the Earth's interior up to 15 000 m and more, as well as to evaluate the main engineering parameters and features of heat and mass transfer processes in the conditions of contact melting of earth rocks.

The obtained values of the speed of vertical gravitational immersion of an autonomous thermal drill, the values of operating temperatures on the working surface of the thermal drill. It has been established that the use of high-temperature autonomous thermal drills as a source of high-temperature heat for a deep autonomous thermal drill makes it possible to eliminate all limiting factors for traditional deep drilling and to practically implement fundamentally new possibilities using high temperature as the main operating parameter. The presented physical-mathematical model makes it possible to determine the main parameters necessary for the development of technical and technological proposals for the conceptual design of new deep-sea equipment and other thermo-melting devices of various purposes and to investigate in detail the thermophysical processes that arise and flow in the area around the thermal drill during its gravitational immersion into the deep subsoil Earth

Key words: deep minerals, thermal drilling, autonomous thermal drill-geoprobe, nuclear reactor, physical-mathematical model, engineering-physical concept, geo-technologies.

REFERENCES

1. Lebid, V.P. Pro osoblyvosti osvoinnia novoho napriamu heolohorovidvalnykh robit u Skhidnomu rehioni Ukrainy. Stattia 2. Kontury hlybnoyi modeli. *Mineralni resursy Ukrainy (MRU)*. 2016. № 4. S. 39–46.
2. Iakymchuk, M.A., Korchahin, I.M. Novi svidchennia na koryst abiohennoho henezysu vuhlevodniv za rezultatamy aprobatsii priamoposhukovykh metodiv u riznykh rehionakh svitu. *Dopov. Nats. akad. nauk Ukr.* 2020. № 9. S. 53–60.
3. Kutas, V.V., Andriushchenko, Yu.A., Omelchenko, A.D. (2013). Hlybnyina budova zemnoi kory v raioni Kryvorizkoi struktury za heoloho-heofizychnomu i vplyv tekhnohennoho chynnyka na proiav lokalnoi seismichnosti. *Heofichnyi zhurnal*. 35 (3), S.156–165.
4. Mykhalevych, L. Fenomenalne dosiahnennia z vydobutku nafty poviazane zi Skhidnytseiu. *Skhidnytska hromada (internet-vydannia)*. 27.04.2021.
5. Stefurak, R.I., Yaremiichuk, R.S. Istorychni narisy burinnia naftovykh sverdlovin – vid proektu do praktyky (Pohliad u z mynuloho u maibutnie). *Mineralni resursy Ukrainy*. 2021. № 3. S. 24–27.
6. Enerho-servisna kompaniia "ESKO-PIVNICH" is under construction. URL Shortener – Short URLs & Custom Free Link Shortener. *Bitly*. URL: <https://bit.ly/3kN1Vch>.
7. Burisma Group rozpochala burinnia sverdlovinny proektnoiu hlybnoiu 6 200 m. *Internet-vydannia "Poltavshchyna"*. URL: <https://poltava.to/project/5135/> (data zvernennia: 04.07.2023).
8. Kutcherov, V., Krayushkin, V. Deep-seated abiogenic origin of petroleum: from geological assessment to physical theory. *Reviews of Geophysics*. 2010. 48 (1), RG1001.
9. Cao, B., Bai, G., Wang, Y. More attention recommended for global deep reservoirs. *Oil & Gas Journal*. 2013. 111 (9). S. 78–85.
10. Vashchenko, V.N., Pisarenko, T.V., Yarmolenko, V.K. (1998). Problemy razvedki netradsitionnykh istochnikov uglevodorodov v serpentinizirovannom sloe kontinentalnoi kory. *VIII konferentsia stran SNG "Problemy ekologii i ekspluatatsii ob'ektov energetiki"*. Kyiv, 1998. S. 68–70.
11. Fast traveling-wave reactor of the channel type / V.D. Rusov et al. *Mizhdystsypynarni doslidzhennia skladnykh system*. 2017. № 9. P. 36–57. DOI: 10.31392/2307-4515/2017-9.3.
12. Ruzhynska L., Kuzmenko K. Matematychna model teploobminu pry peremishuvanni mishalkamy z mahnitnym pryvodom. *Repozytarii NTU KhPI*. URL: https://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/11110/1/vestnik_HPI_2011_10_Ruzhynska_Matematychna.pdf.
13. Ekonomichna otsinka vykorystannia yadernoi enerhetychnoi ustanovky dlia pidvyshchennia efektyvnosti vydobutku nafty v Ukraini. *Repozytarii NTU KhPI*. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/637a7707-4923-4701-8406-ba4be34b56f8>.
14. Vashchenko, V.N. Vohnyshcha hlybokofokusnykh zemletrusiv: Monohrafiia. Kyiv, 1995.
15. Vashchenko, V.M., Pysarenko, T.V. Pro mozhlyvosti kontaktnoho ponadhlybnoho pronykennia. *Visnyk Kyivskoho universytetu*. Ser. "F.-m. nauk". 1995. № 1. S. 326–336.
16. Kakaiev, A.A., Rusov, V.D., Tarasov, V.O., Einhorn, M.V., Chernenko, S.A., Vashchenko, V.M.,

Behlarian, M.Ie. Ultrapovilne yaderne horinnia uran-plutoniievoho rozshcheplivvanoho seredovyshcha na epiteplovnykh neutronakh. *Prohres v yadernyii enerhetytsi*. 2015. 83. 105.

17. Tarasov, V.A., Shernezhenko, S.A., Kakaev, A.A., Smolyar, V.P., Sherstnyova, O.A., Tverdohlib, E.A., Rusov, V.D. The temperature Kurdyumovs sharpening modes in the uranium-plutonium fission fuel of epithermal wavetravelling reactor. *Abstract of 12-th Chaotic Modeling and Simulation International Conference (CHAOS 2019)*, Chania, Crete Greece, 19–22 June, 2019. 316.

18. Vaschenko, V., Vachev, B., Pisarenko, T. (2009). Physical, technical and engineer concept of ultradeep nuclear geoprobes. 13 (2), 77–83.

19. Hrabov, L.N., Mershchyi, V.I., Pysarenko, T.V. (2000). Optyimizatsiia protsesu termokontaktynoho plavlennia materialiv. 1. S. 94–99.

20. Vashchenko, V.M., Pisarenko, T.V. (1998). Problemy vyboru konstruktivnykh materialiv dlia ponadhlybnykh termozondiv. *Visnyk Kyivskoho universytetu*. Seriiia “F.-m. nauk”. 1. S. 318–330.

Стаття надійшла 05.04.2023