

УДК 550.34:504.05

Volodymyr Vashchenko¹, doctor of physical and mathematical sciences, professor
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1585-1229> *e-mail*: nucleoroid@gmail

Iryna Korduba², candidate of technical sciences, associate professor of the department of technology of environmental protection and labor protection
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5135-8465> *e-mail*: uaror-korduba@ukr.net

¹Interdepartmental Scientific Center for Fundamental Research on Energy and Ecology, Odesa, Ukraine

²Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

EXPLORATION AND EXTRACTION OF DEEP MINERALS WITHOUT MINES AND QUARRIES WITH THE HELP OF NUCLEAR AUTONOMOUS THERMAL DRILLS-GEOPRODES

Abstract. *The Earth's interior at 10–15 km depth horizons is a geostrophysical space within which direct contact access of research instruments and other devices is not yet possible. At the same time, the list of fundamental and applied tasks that can be solved with the help of direct contact deep research of deep matter with the delivery of its samples to the surface of the Earth is a rather voluminous process and has an extraordinary scientific and technical significance, physical significance. Extraction of deep minerals without mines and quarries with the help of nuclear geosondes, for this it is necessary to consider the hydrodynamic problem of the vertical melt flow from the front part of the geosonde in the opposite direction to the movement of the geosonde vector. The need for a comprehensive consideration of thermophysical and hydrodynamic problems is justified by the presence of a common parameter – the speed of the geosonde as a heat source. The paper examines aspects of the theory and construction of autonomous nuclear deep thermal drills-geoprobess, which are used to solve fundamental scientific and applied industrial tasks, as well as significantly reduce the ecological burden on the environment with the help of geotechnical methods and means of exploration and extraction of deep minerals. The purpose of this work is a detailed theoretical study of the most fundamental possibility of creating ultra-deep nuclear autonomous geoprobess-thermodrills and an assessment of the main engineering parameters of the heat and mass transfer process in real conditions of contact melting of deep rocks. The results of theoretical studies show that the possibility of deep thermal penetration is theoretically substantiated quite correctly. Moreover, even today the problem of creating an ultra-deep geosonde is a fundamentally solvable scientific-technical and engineering-physical task. New deep industrial geotechnologies are a fundamentally new concept of greening the mining process and are suitable for the development of poor and deep ore horizons for which the construction of mines or quarries is impractical or impossible.*

Keywords: *thermal drilling; nuclear reactor; autonomous thermodrill-geoprobe; geotechnologies.*

В.М. Ващенко¹, І.Б. Кордуба²

¹Міжвідомчий науковий центр фундаментальних досліджень з питань енергетики і екології, м. Одеса, Україна

²Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

РОЗВІДКА ТА ВИДОБУТОК ГЛИБИННИХ КОРИСНИХ КОПАЛИН БЕЗ ШАХТ І КАР'ЄРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ЯДЕРНИХ АВТОНОМНИХ ТЕРМОБУРІВ-ГЕОЗОНДІВ

Анотація. Надра Землі на горизонтах глибин 10–15 км є геоастрофізичним простором, у межах якого поки неможливий безпосередній контактний доступ дослідницьких приладів та інших пристроїв. Водночас перелік фундаментальних і прикладних завдань, які можна вирішити за допомогою прямоконтактних глибинних досліджень глибинної речовини з доставкою її зразків на поверхню Землі, досить об'ємний і має надзвичайну науково-технічну значимість та інженерно-фізичну цінність. Видобуток глибинних корисних копалин без шахт і кар'єрів за допомогою ядерних геозондів потребує розгляду гідродинамічної задачі вертикального потоку розплаву від лобової частини геозонда в протилежному напрямку до руху вектора геозонду. Необхідність комплексного розгляду теплофізичних і гідродинамічних задач обґрунтовується наявністю загального параметра – швидкості руху геозонда як джерела тепла. У роботі розглянуто аспекти теорії та побудови автономних ядерних глибоких термічних бурів-геозондів, використання яких має велике значення для істотного зниження екологічного навантаження на навколишнє середовище. Метою даної роботи є детальне теоретичне дослідження найбільш принципової можливості створення надглибинних ядерних автономних геозондів-термобурів та оцінка основних інженерних параметрів процесу тепломасообміну в реальних умовах контактного плавлення глибинних порід. Результати теоретичних досліджень показують, що можливість глибинного термічного проникнення теоретично обґрунтовується достатньо коректно. На сьогодні проблема створення надглибинного геозонду є принципово вирішуваним науково-технічним та інженерно-фізичним завданням. Нові глибинні промислові геотехнології – це нова концепція екологізації процесу видобутку корисних копалин, і вони придатні для розробки бідних та глибоких рудних горизонтів, для яких недоцільне або неможливе спорудження шахт чи кар'єрів.

Ключові слова: термобуріння; ядерний реактор; автономний термобур-геозонд; геотехнології.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.104-110>

Вступ

Земні надра на глибинних горизонтах 10–15 км є геоастрофізичним простором, у межі якого безпосередній контактний доступ для дослідницьких приладів та інших пристроїв поки що неможливий. При цьому перелік фундаментальних та прикладних задач, що можуть бути вирішені за допомогою прямих контактних глибинних досліджень глибинної речовини з доставкою її проб на поверхню Землі, досить об'ємний і має надзвичайну наукову та інженерно-фізичну цінність [1].

Однак, не дивлячись на сучасний прогрес у технологіях глибокого буріння, досі не вдається підняти на поверхню Землі зразки речовини земної мантії. На

глибинах близько 10 км температура земних надр досягає приблизно 300–350°C, а на глибинах близько 12 км її значення може сягати понад 530°C.

При таких температурах будь-які бурові розчини стають непридатними для використання. Додатковим обмеженням глибинного буріння є високий тиск в глибинних надрах Землі, який призводить до блокування та руйнування бурових механізмів. Крім того, у тріщинуватих породах на стінках свердловини внаслідок динамічних навантажень утворюються каверни, які також заважають бурінню.

Досвід Кольської надглибокої свердловини показав, що навіть з використанням найсучаснішого бурового обладнання проходження свердловини глибиною до 15 км займе понад 20 років і вимагатиме сотень мільйонів доларів.

Вигідною альтернативою традиційному глибокому бурінню в умовах високих температур і тисків може стати метод термічного проплавлення порід за допомогою автономних термобурів-геозондів з потужними автономними теплогенераторами. Для таких пристроїв висока температура стає робочим параметром і втрачає свої обмежувальні властивості. Спростується також і проблема захисту від високих тисків.

Серед відомих на сьогодні генераторів теплової енергії з досить тривалим терміном її генерації найпотужнішими є ядерні реактори. Розігрітий ядерним теплом геозонд-термобур з тугоплавким корпусом буде розплавляти породу, що контактує з ним, і під власною вагою опускатиметься углиб земних надр. При цьому в земних породах до певних глибин можна забезпечити такий заданий тепловий режим термобуріння, при якому стінки свердловини над геозондом будуть зміцнюватися склоподібним шаром охолодженого розплаву.

Головною метою даної роботи є детальне теоретичне дослідження самої принципової можливості створення надглибинних ядерних автономних геозондів-термобурів та оцінка основних інженерних параметрів процесу тепломасоперенесення в реальних умовах контактного плавлення глибинних земних порід.

Основний зміст

До початку нинішнього століття не проводилися детальні теоретичні, фізико-математичні та інженерно-фізичні аналізи проблеми глибинного проникнення в земні надра, за допомогою автономного ядерного термобура при тих теплових параметрах, які йому може забезпечити реальний ядерний реактор з реально прийнятними габаритно-масовими характеристиками [2].

Задача про вертикальний рух геозонду в гірських породах або крижаних товщах внаслідок їх проплавлення зводиться до розгляду самоузгодженого процесу поширення тепла від поверхні корпусу геозонду через шар розплаву навколо нього до твердої породи для її прогрівання та плавлення. При цьому також необхідно розглянути гідродинамічну задачу про вертикальне перетікання розплаву від лобової частини геозонду в протилежному до вектора його руху напрямку.

Необхідність комплексного розгляду теплофізичної та гідродинамічної задач обґрунтовується наявністю загального параметра – швидкості руху геозонду як теплоджерела. Для створення математичної моделі, адекватної по відношенню до процесів тепломасоперенесення при контактному плавленні, використовувану систему рівнянь необхідно замкнути рівнянням поширення тепла в оточуючій породі. Цю систему рівнянь можна вирішити шляхом

введення малого безрозмірного параметра, який визначається відношенням найменшої товщини шару розплаву до величини характерного розміру самого геозонду. Значення цього параметра можуть змінюватися в діапазоні величин від 10^{-3} до 10^{-4} .

Далі методом чисельного комп'ютерного інтегрування можна отримати із заздалегідь заданою точністю наступні головні вихідні інженерно-фізичні параметри: швидкість руху геозонду, товщину шару розплаву навколо геозонду, поля швидкостей та температур розплаву та температуру нагріваючої поверхні геозонду.

Для оптимального за масо-габаритними параметрами геозонду, з реально можливою щільністю теплового потоку в 1 МВт/м^2 через його поверхню в напрямку руху в реальних гірських породах результати оцінки дають значення швидкості опускання геозонду до 10 м/годину , що в десятки разів перевищує швидкість проходження традиційними буровими методами. За такої швидкості для неперервного проходження всієї земної кори з товщиною приблизно в $30\text{--}40 \text{ км}$ потрібно від 125 до 167 діб. А в активну зону ядерного реактора потрібно завантажити близько 100 кг ядерного палива з U235 , що добре узгоджується з характеристиками сучасних малогабаритних ядерних реакторів.

Слід також відмітити, що для оптимізації процесу термобуріння значну роль відіграє форма теплоактивної робочої поверхні. При цьому основними оцінюючими критеріями є швидкість опускання геозонду та коефіцієнт корисної дії (ККД), що визначається як відношення мінімальної потужності, що витрачається на забезпечення вертикального руху геозонду із заданою швидкістю, до всієї потужності, що знімається з робочої поверхні геозонду.

Розрахунки конструкцій геозондів з ізотермічною поверхнею однакової потужності дали найкращі показники для параболічної поверхні нагрівання. Результати теоретичних досліджень показують, що можливість глибинного термічного проникнення теоретично обґрунтовується достатньо коректно. Більше того, вже сьогодні проблема створення надглибинного геозонду є принципово вирішуваним науково-технічним та інженерно-фізичним завданням.

Створення геозонда, здатного працювати при тиску 7000 бар та при температурах 1600°C , дозволить здійснити транскорове кероване проникнення в надра Землі. Звичайно, що для керування геозондом потрібні спеціальні термостійкі пристрої та керувально-вимірні прилади, здатні працювати в екстремальних термобаричних умовах. Тому термічний метод буріння, що розглядається, не має альтернативи серед інших відомих методів буріння за швидкістю та глибиною проникнення в земні надра. А обмеження ядерного термобуріння визначаються, в основному, кількістю ядерного пального, термостійкістю конструкційних матеріалів та характеристиками міцності самої конструкції геозонду. Важливим для створення ядерного геозонду-термобуру також є наявність та можливість вибору ядерного теплогенератора та конструкційних матеріалів і комплектуючих для основних систем геозонду – корпусної оболонки та його лобової теплової “коронки”. Необхідні матеріали повинні поєднувати високу міцність, хімічну стійкість, теплопровідність, термостійкість, задану електропровідність та інші властивості.

Сучасні конструкційні матеріали здатні забезпечити роботу геозонду при температурах до 1600°C і вище, тоді як температура плавлення більшості реальних гірських порід, що входять до складу земної кори, становить 1100°C .

Крім цього, в таких температурних умовах конструкція геозонду повинна витримувати високі тиски і мати високу хімічну та радіаційну стійкість. Для цього прийнятні матеріали з карбідної та нітридної кераміки. Нітридо-кремнієві матеріали відносяться до діелектриків, а карбідо-кремнієві – до напівпровідників. Крім керамічних матеріалів, для створення лабораторних моделей геозондів та проведення з ними дослідницьких випробувань можуть використовуватися графітові матеріали. Будучи доступними та недорогими, вони поступаються кераміці лише за хімічною стійкістю та механічною міцністю.

В даний час в Антарктиді здійснюється багаторічний Європейський буровий проєкт ЕРІСА з вибурування глибинних крижаних кернів. Виконується цей проєкт спільно Бельгією, Францією, Голландією, Німеччиною, Італією, Норвегією, Швецією, Швейцарією та Великою Британією.

Проходження льодової свердловини глибиною до 4 кілометрів в умовах Антарктиди вимагає значних ресурсів. У майбутньому нові автономні термокригобури повинні виключати застосування екологічно небезпечних незамерзаючих рідин, що використовуються в сучасних засобах льодового термобуріння.

Взагалі прикладне промислове застосування термозондів може бути найрізноманітнішим і несподіваним. Автономні промислові термобури роблять можливим створення нових геотехнологій, застосування яких не вимагатиме присутності гірників під землею та не завдаватиме екологічної шкоди навколишньому середовищу тому, що супроводжуються гігантськими териконами та відвалами породи.

Сучасне підземне підприємство лише за добу поглинає під землю до 200 кубометрів кріпильного добірного лісоматеріалу, до 250 тисяч кубометрів повітря, 200 тисяч кіловат годин електроенергії, 2 500 тонн вибухівки. Під землю подаються труби, рейки, металоконструкції, побутове обладнання та матеріали. Крім того, у вугільних басейнах з кожної тонни вугілля на поверхню відкачуються десятки тонн води. А збільшення глибин видобутку копалин помітно знижує якісні показники видобутку.

Легкодоступні для розробки пласти вже вироблені або рухаються до цієї межі, тому розвиток гірничодобувної підземної промисловості потребує нових вкладень. Підземні розробки копалин на сьогодні поглибилися до 600 метрів і більше. Однак на таких глибинах в умовах підвищення тиску гірських порід людина з традиційною технікою вже не здатна керувати підземними ситуаціями та процесами і бути їх господарем.

Сучасні геотехнології є продуктом геології, фізики, хімії та інших наук. Такий прогресуючий конгломерат наук у майбутньому обов'язково запропонує нові, важливі для практики, методи видобутку копалин, які залучать до сфери геотехнологій традиційні та нові корисні копалини. Нові глибинні промислові геотехнології – це принципово нова концепція екологізації процесу видобутку корисних копалин, і вони придатні для розробки бідних та глибоких рудних горизонтів, для яких недоцільне або неможливе спорудження шахт чи кар'єрів. У надра Землі можна перенести навіть частину ливарного процесу. А перелік корисних копалин, які можна добувати геотехнічними методами, великий.

Іншим перспективним застосуванням є можливість розвитку нових методів доступу до невичерпних джерел геотермальної енергії, використовуючи різні види агрегатного стану енергоносіїв, а також комбінованих циклів геоенергетичних технологій.

Таким чином, автономні зонди-геонавти, що можуть запускатися в напрямку, діаметрально протилежному космічним вертикалям, а саме – у геокосмічні надра нашої Землі, є по своїй суті геокосмічною технікою. І чим швидше буде створено таку принципово нову техніку, тим швидше гірничодобувна промисловість набуде нових максимально екологічних методів одержання корисних копалин без шахт та кар'єрів. Використовуючи ядерний реактор під Землею як теплогенератор, можна забезпечити необхідний діапазон робочих температур і закачувати під Землю холодні реагенти для їх нагрівання "на місці" до ефективних робочих температур.

Висновки

На сьогодні існує можливість створення безпечних ядерних реакторів, що працюють на найпоширенішому у природі та дешевому ізотопі ^{238}U . В основу створення таких реакторів покладено концептуальну ідею надповільного нейтронно-ядерного фронтального горіння Феоктистова-Теллера, суть якої полягає в тому, що головним гальмом і абсолютним захистом проти вибухового розвитку ядерної реакції в ядерних енергетичних конструкціях має бути 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 непереможні закони фізики. Реактори з внутрішньою безпекою відповідно до точного висловлювання відомого фізика-ядерника Л. П. Феоктистова – це ядерні установки, які ніколи не вибухають. Такі ядерні реактори, на відміну від традиційних реакторів, не вимагають надкритичного завантаження ядерного палива, а отже, принципово не здатні вибухнути. В них також виключається участь оператора [3–6], а також вилучаються з ядерного паливного циклу технологічні процеси збагачення ядерного палива – в їхніх активних зонах спалюється природний і навіть технічний U^{238} при відсутності системи регулювання реактивності реактора, а ступінь вигорання палива може досягати 5–70% і вище.

Такі безпечні реактори можна використовувати в будь-яких важкодоступних місцях планети. Їх створення може позитивно вплинути на розвиток багатьох матеріальних та духовних цінностей у суспільстві, кардинально змінити технологічний стан та економіку майбутньої ядерної енергетики світу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Феоктистов Л.П. Нейтронно-подільна хвиля, ДАН СРСР, 1989, Т. 309, С. 864.
2. Андриевский Р.Л., Спивак И.И. Нитрид кремния и материалы на его основе. М.: Металлургия, 1984. – 137 с.
3. Ващенко В.Н. Очаги глубокофокусных землетрясений. – Киев, 1995 г. – 96 с.
4. Бутковский А.Г., Малый С.А., Андреев Ю.Н. Оптимальное управление нагревом металла. – М.: Металлургия, 1972, 440 с.
5. В.И. Белый, Л.Л. Васильева, В.А. Грищенко и др. Нитрид кремния в электронике – М.: Наука, 1982. – 197 с.
6. Ващенко В.М., Писаренко Т.В. Про можливість контактного понадглибинного проникнення // Вісник Київського університету. Сер. ф.-м.наук. – 1995. – №1. – С. 326–336.
7. Ващенко В.М., Писаренко Т.В. Проблеми вибору конструкційних матеріалів для понадглибинних термозондів // Вісник Київського університету. – Серія ф.-м. наук, 1998, №1, С. 318–330.

8. Ващенко В.Н., Писаренко Т.В. Проблемы и техника контактного проникновения в глубинные недра космических объектов // Сучасні технології в аерокосмічному комплексі. Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції, 9–11 вересня 1997 року, Житомирський інженерно-технологічний інститут. 1997. С. 21–22.
9. Ващенко В.Н., Писаренко Т.В. Экологические проблемы, связанные с глубокой добычей энергоресурсов // Тезисы докл. VI конф. стран СНГ «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». – 1996. – С. 76–77.
10. Ващенко В.Н., Писаренко Т.В., Ярмоленко В.К. Проблемы разведки нетрадиционных источников углеводородов в серпентинизированном слое континентальной коры // Тезисы докл. VIII конф. стран СНГ «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». – Севастополь, 1998. – С. 68–70.

Стаття надійшла до редакції 09.11.2022 і прийнята до друку після рецензування 16.02.2023

REFERENCES

1. Feoktistov, L. P. (1989). Neutron splitting wave. *DAN USSR*, 309, 864.
2. Andrievsky, R. L., & Spivak, I. I. (1984). Silicon nitride and ero-based materials. Moscow: Metallurgy [in Russian].
3. Vashchenko, V. N. (1995). Sources of deep-focus earthquakes. Kyiv [in Russian].
4. Butkovsky, A. G., Maly, S. A., & Andreev, Y. N. (1972). Optimal control of metal heating. Moscow: Metallurgy [in Russian].
5. Bely, V. I., Vasilyeva, L. L., Hryshchenko V. A. et al. (1982). Silicon nitride in electronics. Moscow: Nauka [in Russian].
6. Vashchenko, V. M., & Pisarenko, T. V. (1995). On the possibilities of contact over-depth penetration. *Bulletin of the Kyiv University, Ser. Ph.-M.Sc.*, 1, 326–336 [in Ukrainian].
7. Vashchenko, V. M., & Pisarenko, T. V. (1998). Problems of choosing structural materials for deep-sea thermoprobes. *Bulletin of Kyiv University, Ser. Ph.-M.Sc.*, 1, 318-330 [in Ukrainian].
8. Vashchenko, V. N., & Pisarenko, T. V. (1997). Problems and techniques of contact penetration into the deep bowels of space objects. In *Modern technologies in the aerospace complex. Materials of the III International Scientific and Practical Conference* (pp. 21-22). Zhytomyr Institute of Engineering and Technology [in Russian].
9. Vashchenko, V. N., & Pisarenko, T. V. (1996). Environmental problems associated with deep mining of energy resources. In *Theses dokl. VI Conf. of CIS countries "Problems of ecology and operation of energy facilities"* (pp. 76-77) [in Russian].
10. Vashchenko, V. N., Pisarenko, T. V., & Yarmolenko, V. K. (1998). Problems of exploration of non-traditional sources of hydrocarbons in the serpentinized layer of the continental crust. In *Theses dokl. VIII Conf. CIS countries "Problems of ecology and operation of energy facilities"* (pp. 68–70). Sevastopol [in Russian].

The article was received 09.11.2022 and was accepted after revision 16.02.2023

Ващенко Володимир Миколайович

доктор фізико-математичних наук, професор Міжвідомчого наукового центру фундаментальних досліджень з питань енергетики і екології

Адреса робоча: пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1585-1229> **e-mail:** nucleoroid@gmail

Кордуба Ірина Богданівна

кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій захисту навколишнього середовища і охорони праці

Адреса робоча: Повітрофлотський проспект, 31, м. Київ, Україна, 03037

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5135-8465> **e-mail:** uaror-korduba@ukr.net