

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ У ЕМПІРИЧНИХ ТА НАУКОВО-ДОСЛІДНИХ ЗАВДАННЯХ ГЕОЛОГІЇ РОДОВИЩ ВУГЛЕВОДНІВ

Владимиров Р.В.

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
майд. Свободи, 4, 61022, м. Харків
postgraduate241991@gmail.com

У статті розглянуто теоретичні та прикладні аспекти використання математичного моделювання у емпіричних і науково-дослідних завданнях геології родовищ вуглеводнів. Обґрунтовано значення математичних методів як універсального інструменту дослідження складних геологічних систем, що забезпечує можливість кількісного опису процесів формування, міграції та акумуляції вуглеводнів у надрах. Висвітлено роль математичного моделювання у створенні цифрових моделей родовищ, оцінці фізико-хімічних властивостей колекторів і прогнозуванні поведінки пластових флюїдів у процесі розробки покладів нафти і газу.

Особливу увагу приділено розмежуванню емпіричних і фундаментальних науково-дослідних застосувань математичного моделювання, яке дозволяє більш чітко визначити методологічні можливості цієї галузі та підвищити ефективність використання математичних моделей у геологічній практиці. Показано, що емпіричне моделювання базується на використанні фактичних даних польових спостережень і лабораторних досліджень та застосовується для побудови геологічних і гідродинамічних моделей родовищ, тоді як науково-дослідне моделювання спрямоване на прогнозування геологічних процесів, формування нових наукових гіпотез і визначення закономірностей розвитку нафтогазових систем.

Крім цього, проаналізовано сучасні напрями розвитку математичного моделювання у геології родовищ вуглеводнів, зокрема геостатистичне, гідродинамічне, геохімічне та термодинамічне моделювання, а також використання методів машинного навчання і штучного інтелекту для обробки великих масивів геологічних даних. Визначено, що інтеграція різних типів моделей у єдину інформаційну систему дозволяє підвищити точність геологічних прогнозів, оптимізувати параметри розробки родовищ і забезпечити ефективне використання ресурсів надр.

Практичне значення дослідження полягає у можливості застосування результатів математичного моделювання під час планування геологорозвідувальних робіт, оцінки перспективності територій для пошуку нафти і газу, визначення параметрів буріння та прогнозування продуктивності свердловин. *Ключові слова:* математичне моделювання, геологія родовищ вуглеводнів, гідродинамічне моделювання, геостатистика, геохімічне моделювання, машинне навчання, характеристика резервуарів.

Mathematical modeling in empirical and research problems of hydrocarbon fields geology. Vladimirov R.

The article considers theoretical and applied aspects of the use of mathematical modeling in empirical and research tasks of the geology of hydrocarbon deposits. The importance of mathematical methods as a universal tool for studying complex geological systems is substantiated, which provides the possibility of quantitatively describing the processes of formation, migration and accumulation of hydrocarbons in the subsurface. The role of mathematical modeling in creating digital models of deposits, assessing the physicochemical properties of reservoirs and predicting the behavior of reservoir fluids in the process of developing oil and gas deposits is highlighted.

Particular attention is paid to the distinction between empirical and fundamental research applications of mathematical modeling, which allows us to more clearly determine the methodological capabilities of this field and increase the efficiency of using mathematical models in geological practice. It is shown that empirical modeling is based on the use of actual data from field observations and laboratory studies and is used to build geological and hydrodynamic models of deposits, while scientific and research modeling is aimed at predicting geological processes, forming new scientific hypotheses and determining the patterns of development of oil and gas systems.

In addition, modern directions of development of mathematical modeling in the geology of hydrocarbon deposits are analyzed, in particular geostatistical, hydrodynamic, geochemical and thermodynamic modeling, as well as the use of machine learning and artificial intelligence methods for processing large amounts of geological data. It is determined that the integration of different types of models into a single information system allows to increase the accuracy of geological forecasts, optimize the parameters of field development and ensure the effective use of subsurface resources.

The practical significance of the study lies in the possibility of applying the results of mathematical modeling when planning geological exploration, assessing the prospects of territories for oil and gas exploration, determining drilling parameters and predicting well productivity. *Key words:* mathematical modeling, geology of hydrocarbon deposits, hydrodynamic modeling, geostatistics, geochemical modeling, machine learning, reservoir characterization.



Постановка проблеми. Розвиток геології родовищ вуглеводнів характеризується постійним ускладненням умов дослідження надр та зростанням вимог до точності геологічних прогнозів. Формування родовищ нафти і газу є результатом тривалих геологічних процесів, які включають седиментацію, діагенез, тектонічні рухи, міграцію вуглеводнів та їх накопичення у пастках різного типу. Вивчення цих процесів у природних умовах пов'язане з високим рівнем невизначеності, що обумовлює необхідність використання математичних методів для їх кількісного опису [1-3].

Традиційні геологічні дослідження, засновані на польових спостереженнях і лабораторному аналізі зразків, не завжди забезпечують повне розуміння закономірностей формування родовищ [4, 5]. Особливо складними є випадки, коли геологічна структура характеризується значною неоднорідністю, складною стратиграфією або наявністю тектонічних порушень. У таких умовах математичне моделювання стає необхідним інструментом, що дозволяє відтворити просторову структуру резервуарів, оцінити їх фільтраційні властивості та спрогнозувати поведінку пластових флюїдів.

Використання математичного моделювання в геології родовищ вуглеводнів дозволяє створювати цифрові моделі надр, які відображають фізичні та хімічні властивості порід, параметри пластових систем і умови їх експлуатації. Такі моделі забезпечують основу для прийняття інженерних і економічних рішень, пов'язаних із розвідкою та розробкою родовищ.

Таким чином, конкретизація змісту поняття «математичне моделювання» у геології родовищ вуглеводнів, а також систематизація його емпіричних і науково-дослідних застосувань є практично значущим завданням.

Актуальність дослідження. Світова практика свідчить, що значна частина запасів вуглеводнів знаходиться у складних геологічних умовах, де традиційні методи розвідки не забезпечують достатньої точності прогнозів. У зв'язку з цим особливого значення набуває застосування математичних моделей, які дозволяють оцінити перспективність територій, оптимізувати параметри буріння та підвищити коефіцієнт вилучення вуглеводнів [6, 7].

Поява методів машинного навчання й штучного інтелекту відкриває принципово нові можливості для автоматизованої характеристики колекторів, розпізнавання геологічних образів у великих масивах сейсмічних атрибутів та прогнозування продуктивності свердловин. За таких умов системний аналіз методологічних основ математичного моделювання в геології вуглеводневих родовищ набуває не лише теоретичного, але й суто прикладного значення.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Застосування сучасних методів моделювання у поєд-

нанні з детальним аналізом геологічної будови родовищ є основою для розробки науково обґрунтованих рекомендацій щодо підвищення нафтогазовилучення на родовищах України. Отримані результати можуть бути використані при плануванні та оцінці геологорозвідувальних робіт.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання математичного моделювання, у геології родовищ вуглеводнів, займає провідне місце серед наукових напрямів, спрямованих на підвищення ефективності розвідки та розробки нафтових і газових покладів. Дослідження останніх років свідчать про активний розвиток методів чисельного аналізу, геостатистичного моделювання та цифрових технологій, що дозволяють більш точно відтворювати геологічні процеси та прогнозувати поведінку резервуарів [4, 8].

Важливий внесок у розвиток теорії геостатистичного моделювання зробили дослідники Chilàs J.-P., Delfiner P., які обґрунтували застосування статистичних методів для оцінки просторової мінливості властивостей гірських порід та визначення параметрів колекторів. У їхніх роботах показано, що використання геостатистичних алгоритмів дозволяє враховувати неоднорідність пластів і формувати ймовірнісні моделі розподілу пористості та проникності, що суттєво підвищує точність прогнозування запасів вуглеводнів [1].

Термодинамічне моделювання вуглеводневих систем, зокрема двовимірні математичні моделі для прогнозування утворення відкладень з парів вуглеводнів, демонструють широкий спектр застосувань математичного моделювання – від поверхневих промислових установок до підземних резервуарів [7].

У галузі чисельного моделювання геологічних процесів значна увага приділяється використанню методів математичної фізики для опису динаміки геологічних систем. Розроблено концепції побудови моделей геодинамічних процесів, які враховують теплові, механічні та гідродинамічні фактори формування родовищ. У таких дослідженнях доведено, що застосування чисельних методів дозволяє моделювати розвиток басейнів осадконакопичення, прогнозувати утворення пасток вуглеводнів та визначати умови їх збереження у надрах [2].

Особливу увагу сучасні дослідники приділяють використанню гідродинамічного моделювання для аналізу процесів фільтрації пластових флюїдів. У роботах, присвячених дослідженню продуктивності свердловин, показано, що математичні моделі дозволяють відновлювати роботу свердловин і оптимізувати режими експлуатації родовищ, забезпечуючи підвищення економічної ефективності видобутку [4].

Окремий напрям досліджень пов'язаний із застосуванням методів машинного навчання для аналізу геологічних даних. Сучасні алгоритми дозволяють автоматично класифікувати типи гірських порід,

визначати літологічні характеристики та прогнозувати параметри резервуарів. Використання таких підходів значно розширює можливості математичного моделювання і сприяє підвищенню точності геологічних прогнозів [8].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Незважаючи на інтенсивний розвиток математичного моделювання у геології, низка важливих проблем залишається недостатньо дослідженою. Однією з них є необхідність інтеграції різних типів моделей у єдину систему, здатну відображати складні взаємозв'язки між геологічними, фізичними та технологічними параметрами родовищ. У більшості випадків геологічні, гідродинамічні та геохімічні моделі розробляються окремо, що ускладнює їх використання для комплексного аналізу процесів формування та розробки родовищ.

Тобто, питання комплексного використання моделей для вирішення емпіричних і науково-дослідних завдань геології родовищ вуглеводнів залишається актуальним і потребує подальшого розвитку.

Новизна. Наукова новизна роботи полягає у систематизованому розмежуванні емпіричних і фундаментальних науково-дослідних застосувань математичного моделювання в геології родовищ вуглеводнів, яке ґрунтується на аналізі кола вирішуваних задач, типів використовуваних математичних методів та характеру параметрів геологічних систем, що встановлюються або прогноуються.

Методологічне або загальнонаукове значення. У роботі математичне моделювання розглядається як універсальний інструмент, який забезпечує можливість інтеграції різних типів даних і створення комплексних моделей геологічних систем. Воно дозволяє досліджувати взаємодію між геологічними структурами, пластовими флюїдами та технологічними процесами видобутку, що є необхідною умовою для розробки ефективних стратегій освоєння родовищ.

З загальнонаукового погляду, стаття демонструє продуктивність системного підходу до аналізу методологічного контексту, конкретної наукової дисципліни – виявлення внутрішньої структури методів, їхніх взаємозв'язків, меж застосовності та перспектив розвитку. Такий підхід може бути перенесений на аналогічні задачі систематизації методологічного інструментарію в суміжних геологічних дисциплінах.

Викладення основного матеріалу. Математичне моделювання у геології родовищ вуглеводнів є складним багаторівневим процесом, який поєднує методи математичної фізики, статистики, геології та інженерії для створення узагальненого опису природних систем надр. Його основною метою є кількісне відтворення геологічної будови родовищ, визначення фізичних параметрів колекторів і прогнозування динаміки руху пластових флюїдів у процесі експлуатації. У сучасних умовах розвиток математичного моделювання тісно пов'язаний із цифровізацією

геологічних досліджень, що дозволяє використовувати великі обсяги даних та застосовувати чисельні методи для вирішення складних наукових і виробничих завдань.

Фундаментальне математичне моделювання у геології родовищ вуглеводнів охоплює широкий спектр аналітичних задач, спрямованих на кількісний опис динамічних процесів формування нафтогазових систем. Воно включає аналіз температурних умов утворення органічної речовини, визначення швидкості міграції вуглеводнів, оцінку умов їх акумуляції та збереження у геологічних структурах. Такий підхід дозволяє розглядати родовище не як статичний об'єкт, а як динамічну систему, що змінюється під впливом геологічних і техногенних факторів.

Особливе місце у сучасній геології займає геологічне моделювання, яке полягає у створенні тривимірних цифрових моделей родовищ на основі даних буріння, геофізичних досліджень і лабораторних аналізів. Такі моделі дозволяють визначати геометрію пластів, встановлювати межі колекторів і оцінювати їх фізичні властивості. Використання цифрових технологій забезпечує можливість візуалізації геологічних структур і аналізу їх просторових характеристик, що значно підвищує ефективність геолого-розвідувальних робіт.

Важливим напрямом математичного моделювання є гідродинамічне моделювання, яке застосовується для дослідження процесів фільтрації пластових флюїдів і визначення режимів експлуатації родовищ. У межах цього підходу використовуються рівняння руху рідини у пористому середовищі, які враховують вплив тиску, температури та фізичних властивостей порід. Математичні моделі дозволяють прогнозувати зміну пластового тиску, визначати швидкість руху флюїдів і оцінювати ефективність різних технологічних заходів, спрямованих на підвищення нафтовіддачі [5].

Застосування математичних методів у геології родовищ вуглеводнів передбачає використання чисельних алгоритмів для розв'язання складних систем рівнянь, що описують поведінку геологічних систем. Одним із найважливіших параметрів, який визначається у процесі моделювання, є коефіцієнт проникності порід, що характеризує їх здатність пропускати рідину. Цей параметр залежить від структури порового простору, гранулометричного складу порід і ступеня їх цементування. Визначення проникності є необхідною умовою для оцінки продуктивності свердловин і планування режимів їх роботи.

Сучасні дослідження показують, що ефективність математичного моделювання значною мірою залежить від якості вихідних даних. До таких даних належать результати геофізичних досліджень свердловин, сейсмічні матеріали, дані лабораторного аналізу кернів і показники експлуатації родовищ.

Інтеграція цих даних у єдину інформаційну систему дозволяє створювати комплексні моделі, які відображають реальні умови формування та розробки родовищ.

Крім цього, важливим елементом математичного моделювання є використання термодинамічних моделей, які описують процеси фазових переходів вуглеводнів у пластових умовах. Такі моделі дозволяють визначати температуру і тиск, при яких відбувається конденсація або випаровування флюїдів, а також прогнозувати утворення відкладень у трубопроводах і технологічному обладнанні. У практиці нафтогазової галузі це має важливе значення для забезпечення безперервності видобутку і зниження витрат на технічне обслуговування.

Також, на даний час, у практиці геологічних досліджень значного поширення набули методи машинного навчання та штучного інтелекту, які використовуються для аналізу великих масивів даних. Алгоритми машинного навчання дозволяють автоматично визначати закономірності у розподілі геологічних параметрів і прогнозувати поведінку резервуарів за різних умов експлуатації. Використання таких технологій сприяє підвищенню точності геологічних прогнозів і зменшенню ризиків, пов'язаних із розробкою родовищ [4, 8].

В цілому, у процесі розробки родовищ особливу увагу приділяють оцінці геологічних ризиків, які можуть впливати на ефективність видобутку. Математичні моделі дозволяють визначати ймовірність виникнення небезпечних явищ, таких як прорив води або газу, обвалення порід і зниження продуктивності свердловин. Використання таких моделей забезпечує можливість своєчасного прийняття управлінських рішень і запобігання аварійним ситуаціям.

Важливу роль у геології відіграє моделювання напружено-деформованого стану гірських масивів, яке дозволяє прогнозувати зміни геологічних структур під впливом техногенних навантажень. Такі моделі використовуються для визначення стабільності пластів, оцінки ризику руйнування порід і планування заходів щодо забезпечення безпеки робіт.

Суттєвим елементом математичного моделювання є оцінка економічної ефективності розробки родовищ. У цьому випадку моделі використовуються для визначення оптимальних параметрів буріння, вибору технологій видобутку і розрахунку витрат на експлуатацію родовищ. Інтеграція економічних показників у математичні моделі дозволяє оцінювати рентабельність проектів і приймати обґрунтовані інвестиційні рішення. Для наочного відображення ролі математичного моделювання у геології родовищ вуглеводнів представимо узагальнену структуру використання моделей у процесі дослідження та розробки родовищ (табл. 1).

В цілому, розмежування емпіричних і науково-дослідних застосувань математичного моделювання є принципово важливим для правильного розуміння методологічних можливостей галузі. Емпіричне моделювання, як правило, спирається на безпосередньо виміряні або визначені за промисловими даними параметри і вирішує задачі кількісної інтерполяції та апроксимації: побудова геологічних моделей за даними свердловин, адаптація гідродинамічних моделей до фактичної історії розробки, побудова PVT-моделей за результатами лабораторних досліджень проб флюїдів. Науково-дослідне моделювання, натомість, виходить за межі наявних прямих спостережень і вирішує задачі прогнозу, генерації гіпотез та перевірки теорій: моделювання генерації та міграції вуглеводнів у геологічному часі, чисельне дослідження механізмів формування пасток, прогнозування розподілу порід-колекторів у необурених районах.

Таким чином, математичне моделювання виступає універсальним інструментом дослідження геологічних систем і забезпечує можливість комплексного аналізу процесів формування та експлуатації родовищ вуглеводнів. Його використання дозволяє підвищити точність геологічних прогнозів, оптимізувати технологічні рішення і забезпечити ефективне використання ресурсів надр.

Головні висновки. Математичне моделювання у геології родовищ вуглеводнів є комплексним методологічним інструментом, що об'єднує геоло-

Таблиця 1

Основні напрями застосування математичного моделювання у геології родовищ вуглеводнів

Напрямок моделювання	Основні параметри	Практичне значення
Геологічне моделювання	Структура пластів, товщина, літологія.	Оцінка запасів і визначення меж родовища.
Гідродинамічне моделювання	Тиск, швидкість фільтрації, насиченість.	Прогнозування видобутку і режимів експлуатації.
Геостатистичне моделювання	Пористість, проникність, неоднорідність.	Оцінка просторової мінливості властивостей порід.
Термодинамічне моделювання	Температура, фазовий стан флюїдів.	Запобігання утворенню відкладень і оптимізація технологічних процесів.
Економічне моделювання	Витрати, прибуток, рентабельність.	Обґрунтування інвестиційних рішень.

гічне та гідродинамічне моделювання, геостатистику, геохімічне та термодинамічне моделювання, а також методи машинного навчання. Кожен із цих напрямів вирішує специфічне коло задач і оперує власним математичним апаратом, однак усі вони є взаємодоповнювальними елементами єдиного комплексу моделювання нафтогазової системи. Фундаментальне математичне моделювання охоплює значно ширший спектр аналітичних завдань, ніж геометрична інтерполяція просторових даних, спрямовуючись насамперед на кількісний опис динамічних процесів і генезису нафтогазових систем.

Розмежування між емпіричними та науково-дослідними застосуваннями математичного моделювання є методологічно важливим: перші спираються на прямі спостереження і вирішують задачі інтерполяції та апроксимації, тоді як другі виходять за межі наявних даних, прогножуючи явища і процеси, недоступні безпосередньому спостереженню. Виявлені за допомогою моделювання закономірності будови й розвитку родовищ є основою для наукового обґрунтування раціональних стратегій геологорозвідувальних робіт і розробки покладів.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати дослідження можуть бути використані у різних напрямках розвитку геології родовищ вуглеводнів і суміжних галузей науки та техніки. Насамперед вони можуть бути застосовані під час планування геологорозвідувальних робіт і оцінки перспективності нових територій для пошуку нафти і газу. Використання математичних моделей дозволяє визначати найбільш імовірні зони накопичення вуглеводнів і оптимізувати розміщення свердловин, що сприяє підвищенню ефективності геологічних досліджень.

У загальному контексті, запропонована класифікація методів та їхніх застосувань може слугувати основою для формування уніфікованих стандартів геологічного моделювання та вимог до звітної документації при підрахунку запасів. Перспективним є подальший розвиток інтегрованих підходів до моделювання – поєднання фізично обґрунтованих моделей з методами машинного навчання в гібридних архітектурах, що дозволяють враховувати фізичні обмеження та водночас опрацювати великі масиви промислових даних.

Література

1. Chilès J.-P., Delfiner P. *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*. 2nd ed. Hoboken : *John Wiley & Sons*, 2012. 730 p. ISBN 978-0-470-18315-1.
2. Gerya T. V. *Introduction to Numerical Geodynamic Modelling*. 2nd ed. Cambridge : *Cambridge University Press*, 2019. 471 p. ISBN 978-1-107-14314-2.
3. Hantschel T., Kauerauf A. I. *Fundamentals of Basin and Petroleum Systems Modeling*. Berlin ; Heidelberg : *Springer*, 2009. XVI + 476 p. ISBN 978-3-540-72317-2.
4. Shevtsov V. M., Asadova Kh. B., Djamilov A. F., Omonov S., Abdurakhmonova S. Geological and hydrodynamic modeling as a tool for improving the methodology of designing the development of hydrocarbon deposits at the final stage. *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 410. P. 05029. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341005029>
5. Maučec M., Yarus J. M., Chambers R. L. Next Generation Geological Modeling for Hydrocarbon Reservoir Characterization. *InTech*, 2011. <https://doi.org/10.5772/27275>
6. Qiao Y. Quantitative Simulation of Hydrocarbon Migration. *Earth Science – Journal of China University of Geosciences*. 2005. Vol. 30, No. 2. P. 183–188.
7. Zhang W., Watkinson A. P. Carbonaceous Material Deposition from Heavy Hydrocarbon Vapors. 2. Mathematical Modeling. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2005. Vol. 44, No. 11. P. 4092–4098. <https://doi.org/10.1021/ie0490334>
8. Solanke B., Onita F. B., Ochulor O. J., Iriogbe H. O. Techniques for improved reservoir characterization using advanced geological modeling in the oil and gas industry. *International Journal of Applied Research in Social Sciences*. 2024. Vol. 6, No. 9. P. 2060–2088. <https://doi.org/10.51594/ijarss.v6i9.1542>

Дата першого надходження статті до видання: 30.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026