



**Биков В. О.**, аспірант (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

## **КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОРИСТИХ СЕРЕДОВИЩ В ІГРОВИХ РУШІЯХ**

Вивчення пористих середовищ відіграє вирішальну роль у різних галузях промисловості, включаючи природокористування, видобуток нафти і газу та моделювання потоків підземних вод. Моделювання поведінки потоку рідини в пористих середовищах є критично важливим для таких застосувань, як моделювання підземних вод, видобуток нафти, фільтрація та біомедична інженерія. Традиційні обчислювальні підходи, включаючи аналіз скінченних елементів, методи скінченних різниць і методи скінченних об'ємів, вимагають значних обчислювальних ресурсів, особливо для великомасштабного моделювання або моделювання з високою роздільною здатністю. Нещодавно використання ігрових рушіїв реального часу, таких як Unity3D та Unreal Engine, стало альтернативою для візуального моделювання складних систем в середовищах. Також, разом з рушіями ще додатково використовують фізичні програмні доповнення NVIDIA PhysX та Havok Physics. Таке програмне забезпечення, відоме своєю високопродуктивною графікою та фізичним моделюванням у реальному часі, довели свою ефективність для моделювання систем пористих середовищ з акцентом на інтерактивному дослідженні використовуючи гнучку систему комп'ютерного моделювання, де в режимі реального часу змінюються параметри рівняння досліджуваного явища і наочно зі всіма технічними подробицями промоделює та візуалізує дані явище. Більше того, інтеграція машинного навчання та нейронних мереж у ці рушії підвищує їхню здатність ефективно обробляти складні симуляції.

У цій статті розглядаються обчислювальні підходи до моделювання пористих середовищ в ігрових рушіях, обговорюються сучасні досягнення, тематичні дослідження, виклики та майбутні напрямки досліджень.

**Ключові слова:** нейронні мережі; комп'ютерне моделювання; ігрові рушії; пористі середовища; Unity3D; Unreal Engine; симуляція.

**Вступ.** Пористі середовища – це матеріали, які містять

порожнечі або пори, що дозволяють рідинам протікати крізь них. Прикладами таких середовищ є ґрунти, гірські породи, біологічні тканини та інженерні матеріали, такі як фільтри і пінопласт. Моделювання транспортування рідин через пористі середовища має вирішальне значення в багатьох галузях промисловості та наукових сферах:

- Гідрологія: потік підземних вод через ґрунт, перенесення забруднюючих речовин і кругообіг поживних речовин в екосистемах залежать від пористої природи надр.

- Нафтогазова інженерія: видобуток нафти і газу з підземних резервуарів вимагає точного моделювання руху флюїдів через пористі гірські породи.

- Матеріалознавство: розробка фільтрів, пористих мембран і накопичувачів енергії часто залежить від розуміння того, як рідини і газу взаємодіють з пористими структурами.

Протягом десятиліть пористі середовища моделювали за допомогою добре відомих обчислювальних методів, таких як аналіз скінченних елементів (ACE), методи скінченних різниць (MCP) і методи скінченних об'ємів (MCO). Ці підходи передбачають розв'язання складних диференціальних рівнянь у частинних похідних, що описують потік рідини, таких як закон Дарсі для однофазного потоку і рівняння Нав'є-Стокса для багатофазного потоку. Однак, точне розв'язання цих рівнянь вимагає значних обчислювальних зусиль, особливо коли йдеться про великі або дуже деталізовані симуляції. Як наслідок, зростає інтерес до більш ефективних підходів до моделювання, які забезпечують баланс між точністю та обчислювальною продуктивністю.

Ігрові рушії, спочатку розроблені для інтерактивних розваг, перетворилися на універсальні платформи, здатні обробляти складні симуляції в реальному часі. Такі рушії, як Unity3D та Unreal Engine, пропонують потужні фізичні рушії, інтуїтивно зрозумілі інтерфейси та розширені можливості рендерингу, що робить їх привабливими для наукового моделювання. Більше того, завдяки інтеграції алгоритмів машинного навчання та нейронних мереж, ігрові рушії тепер здатні моделювати в реальному часі потік рідини в пористих середовищах, що знаходить застосування в різних галузях промисловості.

**Обчислювальні методи в ігрових рушіях.** Ігрові рушії, такі як Unity3D та Unreal Engine, оснащені передовими фізичними додатковими рушіями, такими як NVIDIA PhysX та Havok Physics, що дозволяють моделювати динаміку жорстких тіл, м'яких тіл та рідин у реальному часі. Ці фізичні рушії спочатку були розроблені для



реалістичних ігрових середовищ, але зараз їх адаптовано для наукових застосувань. Однією з ключових переваг є їхня здатність працювати з великомасштабними симуляціями в інтерактивному режимі, дозволяючи користувачам налаштовувати параметри і негайно бачити результати.

У контексті пористих середовищ потік рідини регулюється фізичними законами, такими як закон Дарсі, який описує потік рідини через пористий матеріал як функцію градієнтів тиску, проникності та в'язкості. Для більш складних багатофазних систем, таких як одночасний потік води, нафти і газу через пористе середовище, можна використовувати рівняння Нав'є – Стокса або рівняння Річардса [1]. Хоча ці рівняння можна розв'язати за допомогою традиційних обчислювальних підходів, ігрові рушії спрощують ці взаємодії, використовуючи евристичні та наближення, які роблять можливим моделювання в реальному часі.

Методи на основі частинок, такі як гідродинаміка згладжених частинок (ГЗЧ), були інтегровані в ігрові рушії для моделювання динаміки рідини. У ГЗЧ рідина представлена як сукупність частинок, які взаємодіють на основі локальних фізичних законів. Цей метод є обчислювально ефективним і добре підходить для моделювання в реальному часі, але роздільна здатність симуляції залежить від кількості використовуваних частинок [1]. Моделювання з вищою роздільною здатністю, хоча і є більш точним, вимагає більше обчислювальних ресурсів, що робить ГЗЧ компромісом між продуктивністю і деталізацією.

Інтеграція машинного навчання і нейронних мереж в ігрові рушії відкрила нові можливості для моделювання пористих середовищ. Навчаючи дані моделі на великих наборах даних симуляцій пористих середовищ, можна прогнозувати поведінку потоку рідини в реальному часі без безпосереднього розв'язання складних рівнянь динаміки.

Згорткові нейронні мережі (ЗНМ), які широко використовуються в обробці зображень, добре підійдуть для прогнозування потоку рідини через графічне зображення пористих середовищ в ігровому рушії. Навчаючи ЗНМ на наборі даних симуляцій потоку рідини через пористі середовища, мережа може навчитися прогнозувати поведінку потоку на основі таких вхідних даних, як геометрія пористого середовища, властивості рідини та граничні умови. Після навчання ЗНМ може генерувати прогнози майже миттєво, що робить її ідеальною для інтерактивного моделювання.

Іншим перспективним підходом є фізично-інформовані

нейронні мережі. Ці мережі включають фізичні закони безпосередньо в свою архітектуру, гарантуючи, що прогнозовані рішення узгоджуються з керуваними рівняннями, такими як закон Дарсі або рівняння Нав'є – Стокса. Мінімізуючи функцію втрат, яка включає залишки цих рівнянь, ШНМ можуть навчитися апроксимувати поведінку потоку рідини з високою точністю, зберігаючи при цьому продуктивність в реальному часі [1].

Використання моделей машинного навчання в ігрових рушіях не лише пришвидшує симуляції, але й дозволяє користувачам взаємодіяти з моделлю в режимі реального часу. Наприклад, користувач може регулювати градієнт тиску або в'язкість рідини в симуляції і миттєво бачити, як ці зміни впливають на потік рідини через пористе середовище.

**Тематичні дослідження.** В науці про навколишнє середовище моделювання потоку рідини через пористі середовища має важливе значення для прогнозування поширення забруднюючих речовин у ґрунті та ґрунтових водах. Традиційно моделі потоків підземних вод ґрунтуються на законі Дарсі і розв'язуються за допомогою обчислювально дорогих методів, таких як аналіз скінченних елементів або методи скінченних різниць. Використовуючи ігровий рушій, дослідники розробили моделі, які візуалізують перенесення забруднюючих речовин через пористі середовища в режимі реального часу. Це дозволяє покращити процес ухвалення рішень у таких ситуаціях, як відновлення ґрунтових вод [2].

Ігрові рушії пропонують новий підхід, забезпечуючи інтерактивне моделювання потоку підземних вод і перенесення забруднюючих речовин у реальному часі. Наприклад, у симуляції Unity3D дослідники можуть моделювати рух підземних вод через шари ґрунту, дозволяючи користувачам регулювати такі параметри, як проникність ґрунту, гідравлічна провідність і концентрація забруднюючих речовин, щоб спостерігати, як ці зміни впливають на потік підземних вод і розповсюдження забруднюючих речовин.

Крім того, поєднання ігрових рушіїв з технологією віртуальної реальності дозволяє створювати імерсивні середовища, в яких користувачі можуть візуалізувати потік підземних вод і перенесення забруднюючих речовин у 3D. Такі середовища особливо корисні для освітніх цілей.

У нафтогазовій промисловості моделі пористих середовищ використовуються для моделювання потоків нафти, газу і води через гірські породи. Ці моделі мають вирішальне значення для оптимізації методів видобутку, прогнозування темпів видобутку та ефективного



управління ресурсами. Однак традиційні симулятори пластів є складними в обчислювальному плані і часто потребують значного часу на обробку даних для отримання результатів [3].

За допомогою ігрових рушіїв можна візуалізувати симуляції покладів у реальному часі. Наприклад, Unity3D модель нафтового покладу може імітувати нагнітання води або газу в поклад і показувати потік рідини, що протікає крізь гірську породу. Інженери можуть взаємодіяти з симуляцією, регулюючи такі змінні, як тиск нагнітання, в'язкість рідини та проникність породи, і одразу бачити вплив на коефіцієнт нафтовіддачі.

Використання нейронних мереж ще більше покращує ці симуляції, дозволяючи прогнозувати потік рідини в реальному часі на основі прогнозованих даних. На практиці це означає, що інженери можуть тестувати різні стратегії видобутку і швидше приймати рішення, підвищуючи ефективність і знижуючи витрати.

**Виклики та майбутні напрямки.** Однією з головних проблем у використанні ігрових рушіїв для наукових симуляцій є баланс між точністю та продуктивністю в реальному часі. Ігрові рушії оптимізовані для швидкості та інтерактивності, але це часто вимагає спрощення базової фізики, що може призвести до зниження точності. Хоча такий компроміс прийнятний для ігрових додатків, наукові симуляції часто вимагають вищого ступеня точності, особливо в таких галузях, як видобуток нафти або відновлення довкілля.

Щоб подолати цей виклик, дослідники вивчають способи підвищення точності симуляцій гідродинаміки в ігрових рушіях. Це включає в себе вдосконалення основних фізичних моделей, покращення роздільної здатності симуляцій на основі частинок, таких як гідродинаміка згладжених частинок, і включення більш складних моделей машинного навчання, які можуть апроксимувати поведінку потоку рідини з більшою точністю.

**Висновок.** Використання ігрових рушіїв для моделювання пористих середовищ відкриває нові можливості для інтерактивного моделювання в реальному часі. Використовуючи передові фізичні рушії та можливості візуалізації таких платформ, як Unity3D і Unreal Engine, дослідники можуть моделювати складну поведінку потоків рідини з більшою ефективністю і доступністю. У поєднанні з методами машинного навчання ці симуляції можуть надавати зворотній зв'язок у реальному часі, що дозволяє швидше приймати рішення в таких галузях, як екологія, нафтова інженерія та матеріалознавство. Проте, залишаються проблеми, особливо в

балансуванні між точністю і обчислювальною потужністю.

1. J. Chen. Physics-informed neural networks for multi-phase flow in porous media. *Computational Fluid Dynamics Journal*. 2023. P. 45–52. 2. N. Kamali, M. Fahs, B. Belfort. Encoder–Decoder Convolutional Neural Networks for Flow Modeling in Unsaturated Porous Media: Forward and Inverse Approaches. *Water Journal*. 2023. P. 13–18. 3. G. Gedric Fraces. Uncertainty Quantification for Transport in Porous media using Parameterized Physics Informed neural Networks. *Neural networks Journal*. 2023. P. 31–38.

## REFERENCES:

1. J. Chen. Physics-informed neural networks for multi-phase flow in porous media. *Computational Fluid Dynamics Journal*. 2023. P. 45–52. 2. N. Kamali, M. Fahs, B. Belfort. Encoder–Decoder Convolutional Neural Networks for Flow Modeling in Unsaturated Porous Media: Forward and Inverse Approaches. *Water Journal*. 2023. P. 13–18. 3. G. Gedric Fraces. Uncertainty Quantification for Transport in Porous media using Parameterized Physics Informed neural Networks. *Neural networks Journal*. 2023. P. 31–38.

---

**Bykov V. O., Post-graduate Student** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

## COMPUTER MODELING OF POROUS MEDIUM IN GAME ENGINES

The study of porous media plays a crucial role in a variety of industries, including environmental management, oil and gas production, and groundwater flow modelling. Modelling the behaviour of fluid flow in porous media is critical for applications such as groundwater modelling, oil production, filtration and biomedical engineering. Traditional computational approaches, including finite element analysis, finite difference methods, and finite volume methods, require significant computational resources, especially for large-scale or high-resolution simulations. Recently, the use of real-time game engines, such as Unity3D and Unreal Engine, has become an alternative for visual modelling of complex systems in environments. In addition to these engines, physics software add-ons such as NVIDIA PhysX and Havok Physics are also used. These software, known for their high-performance graphics and real-time physical modelling, have proven to be effective for modelling porous media systems with an emphasis on interactive research using a flexible computer simulation system where the parameters of the



**equation of the phenomenon under study are changed in real time and the phenomenon is clearly modelled and visualised with all the technical details. Moreover, the integration of machine learning and neural networks into these engines enhances their ability to efficiently handle complex simulations.**

**This article reviews computational approaches to modelling porous media in game engines, discussing current achievements, case studies, challenges, and future research directions.**

***Keywords:* neural networks; computer modeling; game engines; porous media; Unity3D; Unreal Engine; simulation.**