

УДК 378.147:622:004.9(075.8)

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-42>

ІНТЕГРАЦІЯ СИМУЛЯЦІЙ ТА МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ В ПІДГОТОВЦІ ФАХІВЦІВ ГІРНИЧИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ: ДОСВІД І ПЕРСПЕКТИВИ

Кайдан Наталія Володимирівна,

кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри природничо-наукових
та загальноінженерних дисциплін,
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0002-4184-8230

Кайдан Вадим Петрович,

старший викладач кафедри природничо-наукових
та загальноінженерних дисциплін
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»;
старший викладач циклової комісії
з інженерії програмного забезпечення
Хмельницького фахового економіко-технологічного коледжу
Університету економіки і підприємництва
ORCID ID: 0000-0003-2008-3539

Грудкіна Наталія Сергіївна,

доктор технічних наук, доцент,
професор кафедри природничо-наукових
та загальноінженерних дисциплін
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0002-0914-8875

Величко Владислав Євгенович,

доктор педагогічних наук,
професор кафедри методики навчання математики,
фізики та інформатики
ДВНЗ «Донбаський державний педагогічний університет»
ORCID ID: 0000-0001-9752-0907

Федоренко Олена Георгіївна,

кандидат педагогічних наук,
доцент кафедри математики, фізики та інформатики,
ДВНЗ «Донбаський державний педагогічний університет»
ORCID ID: 0000-0002-1897-874X

У статті розглянуто питання модернізації викладання природничо-математичних дисциплін у підготовці фахівців гірничих спеціальностей шляхом інтеграції математичного моделювання та цифрових симуляцій, зокрема платформи PhET. Актуальність дослідження зумовлена потребою забезпечити прикладний, контекстно значущий характер навчання, сформуванню у здобувачів освіти здатності до аналітичного осмислення складних технічних процесів, що відбуваються в гірничому виробництві, а також підвищити інтерес і мотивацію до вивчення фундаментальних дисциплін, які традиційно сприймаються як абстрактні.

Описано специфіку гірничих спеціальностей, що вимагають від фахівців не лише знань, але й умінь працювати з багатофакторними моделями, передбачати наслідки фізичних процесів та ухвалювати рішення в умовах невизначеності. Вказано, що безпека та ефективність майбутньої професійної діяльності значною мірою залежать від здатності глибоко розуміти математичні та фізичні основи гірничих технологій.

Методологія дослідження ґрунтується на поєднанні теоретичних (аналіз літератури, порівняльний аналіз) й емпіричних методів (опитування, спостереження, педагогічний експеримент). В експериментальних групах студенти працювали з PhET-симуляціями, виконували моделювання гірничих процесів, аналізували параметричні зміни та їх вплив на результати. Спостереження показали зростання навчальної активності, ініціативності, аналітичного мислення, а результати опитування засвідчили позитивне сприйняття такої методики здобувачами освіти.

У статті наведено приклади освітніх кейсів, побудовано порівняльні діаграми, запропоновано практичні кроки для впровадження досліджуваного підходу. Зроблено висновок, що поєднання симуляцій та моделювання є ефективним засобом формування професійної компетентності майбутніх гірничих інженерів у цифровій освітній екосистемі.

Ключові слова: моделі PhET, симулятори PhET, цифрові моделі, фізичні симуляції, візуалізація, математичне моделювання, гірнича спеціальність.

Kaidan Nataliia, Kaidan Vadym, Hrudkina Nataliia, Velychko Vladyslav, Fedorenko Olena. Integration of simulations and mathematical modeling in the training of mining specialists: experience and prospects

The article addresses the issue of modernizing the teaching of natural and mathematical disciplines in the training of mining specialists by integrating mathematical modeling and digital simulations, in particular the PhET platform. The relevance of the study stems from the need to ensure the applied, contextually relevant nature of learning, to develop in students the ability to analytically understand complex technical processes occurring in mining, as well as to increase interest and motivation to study fundamental disciplines that are traditionally perceived as abstract.

The article describes the specifics of mining specialties that require specialists not only knowledge but also the ability to work with multifactorial models, predict the consequences of physical processes and make decisions under conditions of uncertainty. It is indicated that the safety and efficiency of future professional activities largely depend on the ability to deeply understand the mathematical and physical foundations of mining technologies.

The research methodology is based on a combination of theoretical (literature analysis, comparative analysis) and empirical methods (survey, observation, pedagogical experiment). In the experimental groups, students worked with PhET simulations, modeled mining processes, and analyzed parametric changes and their impact on the results. Observations showed an increase in learning activity, initiative, and analytical thinking, and the survey results showed a positive perception of this methodology by students.

The article provides examples of educational cases, builds comparative diagrams, and suggests practical steps for implementing the studied approach. It is concluded that the combination of simulations and modeling is an effective tool for developing the professional competence of future mining engineers in the digital educational ecosystem.

Keywords: PhET models, PhET simulators, digital models, physical simulations, visualization, mathematical modeling, mining specialty.

Вступ. Гірничодобувна промисловість є однією з базових галузей економіки, від стабільного функціонування якої значною мірою залежить енергетична, будівельна та металургійна безпека держави. У сучасних умовах інтенсивного технічного прогресу, автоматизації гірничих робіт і впровадження цифрових технологій у виробничі процеси суттєво змінюються вимоги до підготовки фахівців гірничого профілю. Крім традиційних знань із технологій добування корисних копалин, випускник ЗВО повинен володіти навичками системного мислення, здатністю до аналізу складних техногенних процесів і прийняття обґрунтованих рішень на основі математичних моделей та симуляцій. Ці завдання покладають особливу відповідальність на природничо-математичну складову частину підготовки інженерів, зокрема на курси фізики, математики, теоретичної механіки, гідродинаміки, термодинаміки тощо. Саме ці дисципліни формують здатність здобувачів освіти до моделювання процесів руху гірських мас, напружено-деформованого стану порід, динаміки бурових установок, вентиляції шахт і інших

фізичних явищ, що мають вирішальне значення в гірничій справі.

Однак на практиці викладання цих курсів часто стикається з низкою труднощів: абстрактність теоретичного матеріалу, слабкий зв'язок із реальними виробничими ситуаціями, обмеженість традиційних засобів візуалізації. Це знижує інтерес здобувачів освіти й ускладнює формування компетентностей, необхідних для майбутньої професійної діяльності. У цьому контексті особливу цінність набувають цифрові освітні інструменти, які дозволяють створювати динамічні моделі явищ, експериментувати з параметрами, відображати багатофакторні залежності в реальному часі.

Одним із найбільш доступних і педагогічно обґрунтованих рішень є використання інтерактивних симуляцій платформи PhET Interactive Simulations (University of Colorado Boulder), яка надає можливість наочно демонструвати фізичні явища, створювати віртуальні експерименти та формувати прикладне розуміння законів природи. У поєднанні з математичним моделюванням як способом опису, передбачення та

оптимізації фізичних процесів симуляції PhET створюють основу для модернізації змісту та форм викладання природничих дисциплін для гірничих спеціальностей.

Метою статті є аналіз можливостей та досвіду впровадження симуляцій PhET і математичного моделювання в освітній процес у контексті підготовки фахівців гірничого профілю. Завдання статті: окреслити дидактичні переваги такого підходу, навести приклади його практичної реалізації; визначити потенціал для подальшого розвитку цифрово-орієнтованої інженерної освіти.

Методи та методики дослідження. У процесі дослідження було застосовано комплекс взаємопов'язаних наукових методів, які дозволили всебічно проаналізувати особливості впровадження математичного моделювання та цифрових симуляцій у підготовку фахівців гірничих спеціальностей. Насамперед було здійснено аналіз науково-методичної літератури з методики викладання природничо-математичних дисциплін, інженерної педагогіки та сучасних цифрових підходів у технічній освіті, що дало змогу окреслити актуальні напрями дослідження. Метод порівняльного аналізу використовувався для зіставлення ефективності традиційних та інтерактивних форм навчання, зокрема в аспектах мотивації здобувачів вищої освіти, глибини засвоєння матеріалу та орієнтації на професійне застосування знань. У межах моделювання навчальних ситуацій було розроблено освітні кейси, які поєднують використання симуляцій PhET із математичним описом типових гірничих процесів, що дозволило оцінити дидактичну цінність такого підходу. Окрему увагу приділено елементам педагогічного експерименту, що проводився у формі впровадження нових методичних рішень у курсах фізики та механіки для здобувачів освіти гірничих спеціальностей. Крім того, застосовувалися емпіричні методи: опитування та спостереження за навчальною активністю здобувачів освіти, аналіз зворотного зв'язку щодо зручності та ефективності використання цифрових симуляцій. Поєднання теоретичних, практико-орієнтованих та емпіричних підходів забезпечило об'єктивність і практичну значущість отриманих результатів.

Результати та дискусії. У результаті проведеного аналізу науково-методичної літератури було встановлено, що сучасні дослідження у сфері викладання природничо-математичних дисциплін для технічних спеціальностей усе більше фокусуються на інтеграції практико-орієнтованих і візуальних методів навчання. Зокрема, значна частина публікацій акцентує

увагу на важливості формування у здобувачів освіти не лише теоретичних знань, а й прикладних умінь, які безпосередньо пов'язані з їх майбутньою професійною діяльністю. Це особливо актуально для гірничих спеціальностей, де помилка в розрахунках або нерозуміння фізичних процесів може призвести до реальної загрози життю.

Огляд джерел показав, що одним із провідних напрямів модернізації викладання є використання інструментів STEM-освіти, які поєднують теоретичну базу з інженерною практикою, експериментами та цифровими технологіями. Автори дослідження Khaeruddin & Bansong (2022) наголошують на тому, що використання симуляцій PhET у STEM-навчанні суттєво підвищує рівень критичного мислення здобувачів освіти завдяки візуалізації фізичних процесів, інтерактивності та можливості самостійного експериментування [3].

Автори дослідження Alatas & Yakin (2021) доводять, що застосування STEM-навчання з PhET-симуляціями в розділі «Робота та енергія» принципово покращує здатність здобувачів освіти до розв'язання проблем: за результатами квазіексперименту серед 70 учнів 10 класу середній приріст результативності становив 0,71 у групі зі STEM+PhET порівняно з 0,38 у контрольній, що вказує на високий рівень поліпшення навичок розв'язання задач [1].

Дослідники Wu, Tesei, Ayer, London, Luo та Gunji (2018) у своїй роботі аналізують експеримент із впровадження технології змішаної реальності (MR) у лабораторне навчання з дерев'яного каркасного будівництва в рамках інженерної освіти. У порівнянні з контрольною групою, яка працювала за традиційними кресленнями, здобувачі освіти, що використовували MR, продемонстрували значно краще розуміння дизайну, кращу здатність транслювати теоретичні знання в практичні навички, а також вищий рівень залученості та задоволення від експерименту [9].

Автори дослідження Joseph A. Lyon та Alejandra J. Magana (2020) проводять системний огляд літератури щодо використання математичного моделювання в інженерній освіті. Вони аналізують 27 досліджень з акцентом на стратегії здобувачів освіти, педагогічну реалізацію та оцінювання таких активностей. Автори підкреслюють, що математичне моделювання є ключовим інструментом для забезпечення навичок розв'язання складних та неструктурованих завдань, які властиві інженерній професії [4].

Banda i Nzabahimana (2021) у своїй роботі наголошують, що інтеграція симуляцій PhET

у викладання фізики суттєво покращує концептуальне розуміння здобувачів освіти. На основі аналізу 31 експериментального дослідження вони встановили, що найбільший ефект досягається за умов активного або дослідницького підходу, коли здобувачі освіти мають змогу самостійно взаємодіяти із симуляцією до пояснення теорії [2].

У рамках використання методу порівняльного аналізу було здійснено зіставлення результативності традиційного викладання природничо-математичних дисциплін із сучасними підходами, що включають використання симуляцій PhET і математичного моделювання. Аналіз показав, що традиційні форми подачі матеріалу зазвичай обмежуються репродуктивним засвоєнням знань, тоді як інтерактивні інструменти сприяють формуванню глибшого концептуального розуміння, підвищенню мотивації та залученості здобувачів освіти в навчальний процес. Особливо це проявляється в контексті гірничих спеціальностей, де ефективність підготовки визначається здатністю застосовувати знання для розв'язання прикладних технічних задач. Встановлено, що здобувачі освіти, які працюють із цифровими симуляціями та розв'язують задачі через побудову моделей, краще усвідомлюють взаємозв'язок між фізичними законами та реальними виробничими ситуаціями. Це дозволяє зробити висновок, що інтерактивні форми навчання є більш результативними у формуванні професійних компетентностей порівняно з традиційно орієнтованим викладанням.

Отже, аналіз літератури підтвердив необхідність і доцільність упровадження симуляцій та математичного моделювання

в природничо-математичну підготовку здобувачів освіти гірничих спеціальностей як одного з пріоритетних напрямів розвитку інженерної освіти.

Інтерактивні симуляції PhET дають змогу здобувачам освіти візуалізувати абстрактні фізичні явища, досліджувати зміну параметрів у режимі реального часу, формулювати припущення, перевіряти гіпотези та встановлювати функціональні залежності між змінними. Однак ефективність таких симуляцій суттєво підвищується, коли їх доповнює системне математичне моделювання (побудова рівнянь, аналіз змінних, графічне представлення результатів, верифікація моделей). Це дозволяє не лише бачити процес, а й осмислювати його кількісно, прогнозувати поведінку системи та приймати обґрунтовані інженерні рішення.

Однією з базових симуляцій для формування прикладних уявлень про закони механіки є PhET-симуляція «Forces and Motion: Basics» («Сили і рух: Основи»). Вона дозволяє моделювати взаємодію сил під час руху тіл, зокрема вплив сили тертя, маси, прикладеної сили та сили тяжіння. Ця симуляція є надзвичайно корисною для здобувачів освіти гірничих спеціальностей, оскільки аналогічні фізичні процеси постійно супроводжують роботу в підземних умовах: переміщення вагонеток, гірничих візків, рух гірничих машин похилими вибоями та горизонтальними транспортними штреками.

У центрі симуляції просте середовище, в якому тіло (ящик, людина або інший об'єкт) переміщується по горизонтальній поверхні під дією прикладеної сили. Користувач може змінювати масу об'єкта, значення сили, коефіцієнту тертя. Також доступна візуалізація векторів сил

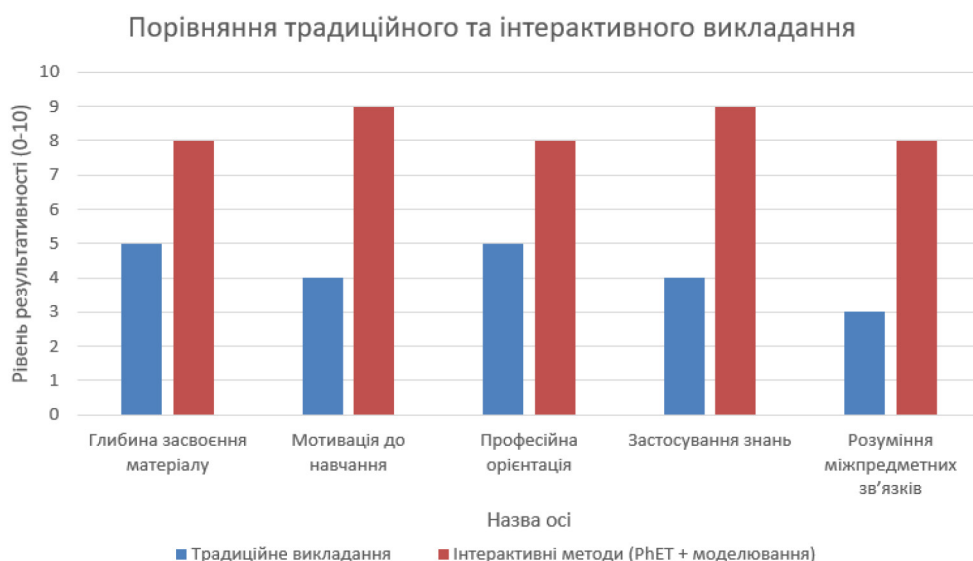


Рис. 1. Діаграма порівняння традиційного та інтерактивного викладання



Рис. 2. Приклад використання симуляції «Forces and Motion: Basics»

(сила тяги, сила тертя, результуюча сила), що дозволяє наочно побачити результат взаємодії різних чинників.

У процесі роботи здобувач освіти експериментує з різними сценаріями: що станеться, якщо на легкий об'єкт прикласти велику силу? Як зміниться рух, якщо збільшити масу? Який вплив має сила тертя на рух? При цьому демонструється класична реалізація другого закону Ньютона ($F = ma$), а також прикладна реалізація понять прискорення, рівномірного та нерівномірного руху, інерції та сили опору середовища.

Особливо цінним є те, що результати відображаються в реальному часі: об'єкт починає рух, змінює швидкість, зупиняється – усе супроводжується графічними індикаторами та числовими значеннями. Це дозволяє здобувачам освіти не лише засвоїти фізичні закони, але й використати їх для обчислень, наприклад, визначити, яку силу необхідно прикласти для переміщення бурової установки по похилій площині з певним коефіцієнтом тертя. Таким чином, подібна симуляція не просто ілюструє теорію, а створює умови для дослідницької діяльності, що відповідає вимогам сучасної інженерної підготовки в гірничій сфері.

Симуляція «Projectile Motion» («Рух снарядів») з ресурсу PhET призначена для вивчення руху тіла, кинутого під кутом до горизонту, і є надзвичайно корисною в підготовці фахівців гірничих спеціальностей. Вона дозволяє моделювати балістичну траєкторію об'єкта, враховуючи вплив сили тяжіння, початкової швидкості, кута запуску, маси та наявності опору повітря. Ці процеси тісно пов'язані з реальними задачами гірничої справи – від розрахунку траєкторії викиду породи до прогнозування дії вибухових хвиль і польоту дрібних частинок під час підривних робіт.

У симуляції здобувач освіти має змогу налаштовувати початкові умови: задавати кут кидання (від 0° до 90°), початкову швидкість (в м/с), вибирати тип об'єкта (гарматне ядро, людина, автомобіль тощо) і вмикати або вимикати опір повітря. Також доступна сітка координат, фіксація траєкторії, анімація руху тіла й точні числові дані щодо максимальної висоти, часу польоту і дальності. Графічне представлення траєкторії дозволяє здобувачам освіти миттєво оцінювати вплив параметрів на форму польоту.

Фізичні закони, які ілюструє ця симуляція, – кінематика (рух у двох вимірах), параболічна траєкторія, дія сили тяжіння, розкладання швидкості на компоненти, а в розширеному режимі – вплив сили опору середовища. Здобувачі освіти отримують змогу закріпити розуміння руху тіла з початковою швидкістю в полі тяжіння Землі, використовуючи реальні числові значення для перевірки формул та обчислень.

У контексті гірничої освіти симуляція «Projectile Motion» дозволяє моделювати прикладні ситуації, наприклад: на якій відстані приземлиться шматок породи після вибуху? Яку початкову швидкість набуде об'єкт, що вилітає з повітряної труби? Як зміниться траєкторія в умовах підземної вентиляції? Відповіді на ці питання здобувач освіти отримує в ході інтерактивного дослідження. Завдяки наочності, гнучким параметрам та високому дидактичному потенціалу симуляція є ефективним засобом формування прикладного інженерного мислення й розвитку навичок аналітичного моделювання в майбутніх гірничих інженерів.

Інтерактивна симуляція «Ramp: Forces and Motion» («Пандус: Сили та рух») з платформи PhET є ефективним інструментом для формування розуміння механіки тіл, що рухаються

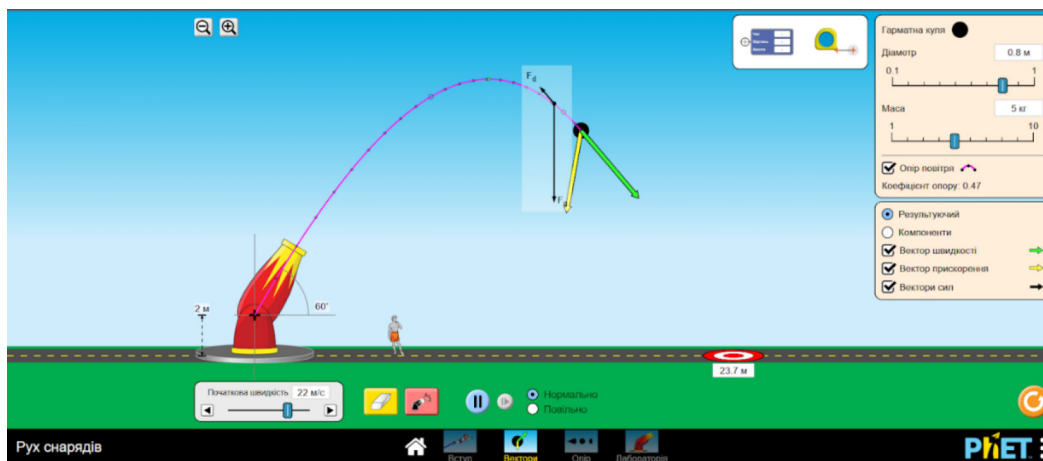


Рис. 3. Приклад використання симуляції «Projectile Motion»

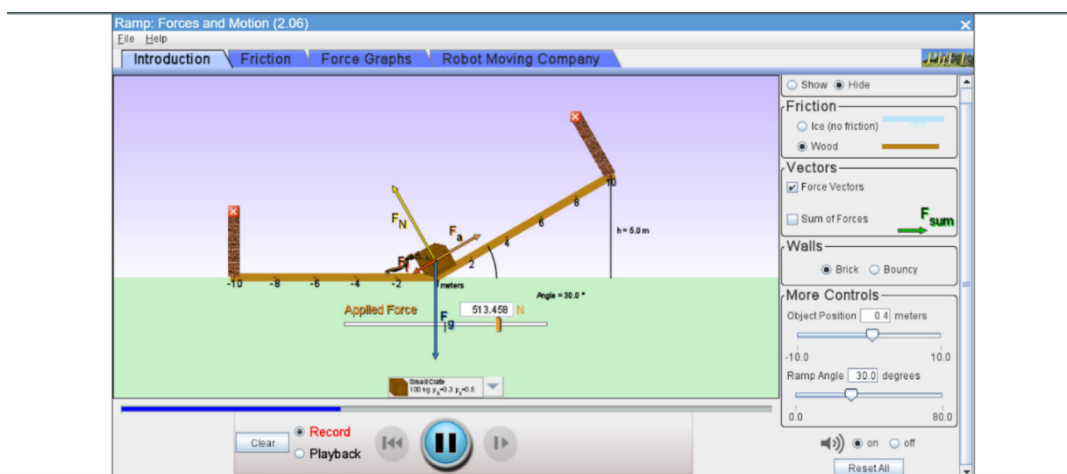


Рис. 4. Приклад використання симуляції «Ramp: Forces and Motion»

похилою площиною. Її застосування в підготовці майбутніх гірничих інженерів особливо актуальне, оскільки більшість гірничих об'єктів (від транспортних шляхів до підйомних систем) працюють саме в умовах ухилу або вертикального компонента.

У цій симуляції користувач може досліджувати рух різних тіл по похилій площині, регулюючи кут нахилу (від горизонтального до майже вертикального), масу тіла, коефіцієнти тертя (ковзання й спокою). Також передбачено відображення векторів сил: сила тяжіння, нормальна сила, сила тертя, прикладена сила, це дозволяє повністю візуалізувати всі сили, які впливають на тіло під час руху похилою поверхнею.

З позиції фізики симуляція дає змогу глибоко опрацювати такі поняття, як розкладання сили тяжіння на компоненти, сили реакції опори, тертя ковзання і спокою, прискорення, рівновага сил, а також закони Ньютона. Для гірничих спеціальностей це дозволяє моделювати ситуації, пов'язані з переміщенням гірничої техніки похилими стволами, транспортуванням вантажів на стрічкових конвеєрах або рухом вагонеток.

Працюючи із симуляцією, здобувач освіти змінює параметри середовища: масу об'єкта, кут нахилу, коефіцієнт тертя, й аналізує, як це впливає на стан спокою або руху об'єкта. Наприклад, можна визначити мінімальну силу, необхідну для початку руху візка по рейках у шахті, або оцінити, за яких умов об'єкт зупиниться самостійно завдяки тертю. У режимі динамічного перегляду відображаються числові значення сили, прискорення, енергії, що дозволяє перейти до розрахунків або порівняння з теоретичними формулами. Ця симуляція є надзвичайно корисною не лише для візуального засвоєння матеріалу, але й для розв'язання практичних задач, пов'язаних із конструюванням транспортних систем у гірничих умовах. Вона сприяє глибшому розумінню ролі сили тертя, аналізу умов безпечного транспортування породи та оптимізації конструкцій похилих площин.

У межах дослідження було реалізовано педагогічний експеримент, спрямований на перевірку ефективності впровадження інтерактивних методичних рішень у викладання фізики

та механіки для здобувачів освіти гірничих спеціальностей. Експериментальна частина полягала в цілеспрямованому включенні симуляцій PhET та завдань з математичного моделювання до структури занять, які раніше проводилися традиційно, у форматі пояснення матеріалу з наступним розв'язанням задач за зразком.

Особливу увагу було приділено формуванню таких компонентів компетентності, як уміння інтерпретувати модель у контексті гірничих процесів, обґрунтовувати вибір змінних і параметрів, аналізувати похибки, робити висновки на основі моделювання. У ході експерименту фіксувалися якісні зміни в поведінці студентів: зростала активність, частота запитань, глибина міркувань, покращувалися результати виконання практичних завдань.

Таким чином, елементи педагогічного експерименту дозволили перевірити життєздатність поєднаного підходу в реальному освітньому середовищі, засвідчивши його ефективність у розвитку аналітичного мислення, інженерної уяви та професійно значущих умінь.

У межах дослідження було використано емпіричні методи, які дозволили отримати об'єктивну інформацію про сприйняття та ефективність інтеграції цифрових симуляцій в освітній процес.

Спостереження за навчальною активністю проводилося в ході занять і полягало у фіксації рівня залученості студентів до виконання завдань, кількості запитань до викладача, ініціативності в побудові моделей та активності під час обговорення результатів. Було зазначено,

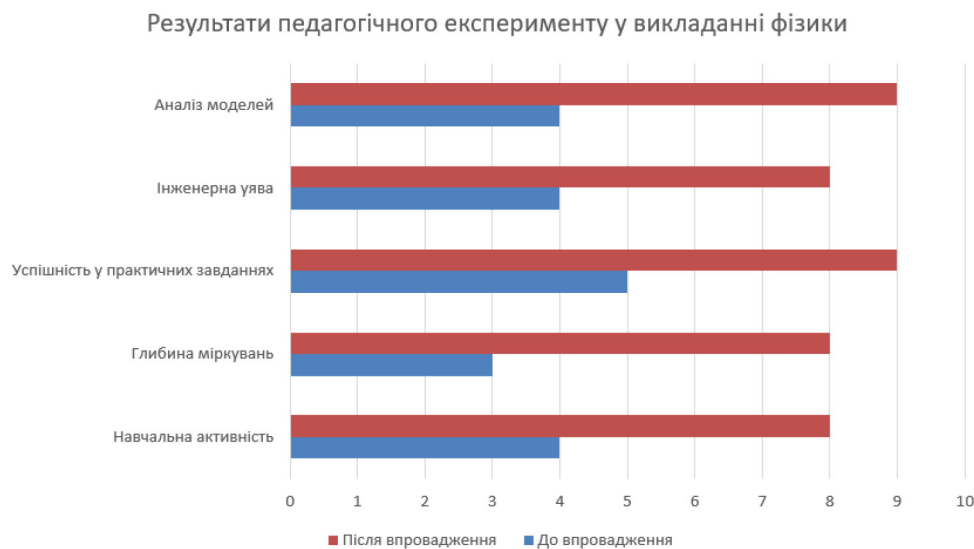


Рис. 5. Діаграма результатів педагогічного експерименту у викладанні фізики

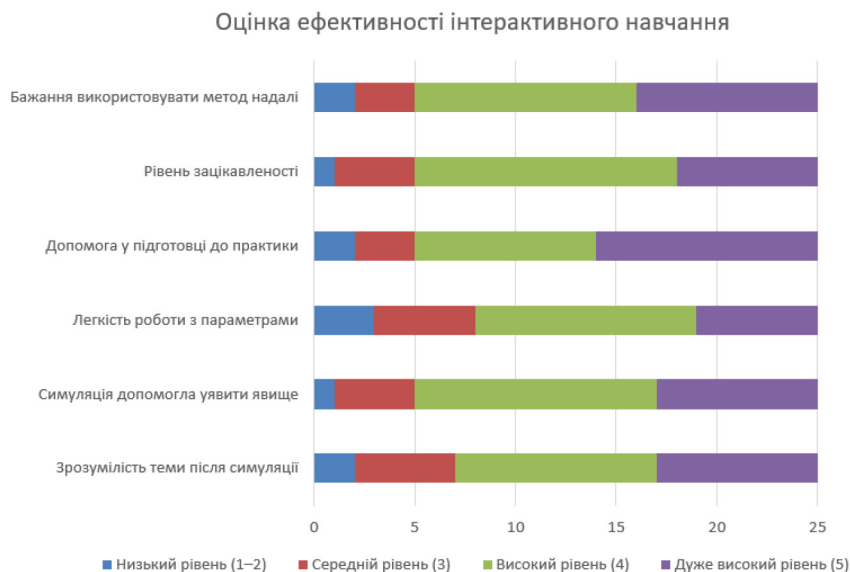


Рис. 6. Діаграма оцінювання ефективності інтерактивного навчання

що студенти, які працювали із симуляціями, демонстрували більшу автономність у прийнятті рішень, виявляли глибший інтерес до явищ, які вони вивчали, та частіше застосовували здобуті знання для пояснення практичних ситуацій.

Аналіз зворотного зв'язку засвідчив, що більшість респондентів вважають цифрові симуляції корисними для кращого розуміння матеріалу, особливо тих тем, які пов'язані з абстрактними або динамічними процесами. Здобувачі вищої освіти підкреслили, що інтерактивна взаємодія з моделями дозволяє швидше зрозуміти суть явища. Отримані результати дозволили підтвердити дидактичну доцільність використання PhET у поєднанні з моделюванням у курсах природничо-математичної підготовки майбутніх гірничих інженерів.

Висновки. Результати проведеного дослідження підтверджують, що інтеграція симуляцій PhET та математичного моделювання

у викладання природничо-математичних дисциплін для здобувачів освіти гірничих спеціальностей є педагогічно доцільною, ефективною та технологічно обґрунтованою. Вона сприяє підвищенню мотивації студентів, розвитку аналітичного мислення, глибшому засвоєнню навчального матеріалу та набуттю професійно орієнтованих компетентностей. Порівняльний аналіз, результати педагогічного експерименту та емпіричні дані з опитувань засвідчили переваги поєднання візуалізаційних інструментів і кількісного аналізу явищ у формуванні готовності здобувачів освіти до реальних виробничих завдань.

Запропонований підхід дозволяє не лише активізувати навчання, але й формувати уміння, що відповідають вимогам сучасного гірничого виробництва: системність мислення, здатність до моделювання, аналізу й прийняття технічно обґрунтованих рішень.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Alatas F., Yakin N. A. The effect of science, technology, engineering, and mathematics (STEM) learning on students' problem solving skill. *JIPF (Jurnal Ilmu Pendidikan Fisika)*. 2021. Vol. 6, № 1. P. 1. DOI: <https://doi.org/10.26737/jipf.v6i1.1829> (дата звернення: 28.06.2025).
2. Banda H. J., Nzabanimana J. Effect of integrating physics education technology simulations on students' conceptual understanding in physics: A review of literature. *Physical Review Physics Education Research*. 2021. Vol. 17, № 2. DOI: <https://doi.org/10.1103/physrevphyseducres.17.023108> (дата звернення: 28.06.2025).
3. Khaeruddin K., Bancong H. STEM education through PhET simulations: An effort to enhance students' critical thinking skills. *Jurnal Ilmiah Pendidikan Fisika Al-Biruni*. 2022. Vol. 11, № 1. P. 35–45. DOI: <https://doi.org/10.24042/jipf.albiruni.v11i1.10998> (дата звернення: 28.06.2025).
4. Lyon J. A., Magana A. J. A Review of Mathematical Modeling in Engineering Education. *International Journal of Engineering Education*. 2020. Vol. 36(1). P. 101–116.
5. Revolutionizing education: using computer simulation and cloud-based smart technology to facilitate successful open learning / S. Papadakis et al. *CEUR Workshop Proceedings*. 2022. № 3358. P. 1–18.
6. Harnessing immersive technologies for enhancing mathematical logics education in secondary schools / Y. Velychko et al. *CEUR Workshop Proceedings*. 2025. № 3918. P. 70–84.
7. The use of computer modeling in the educational process based on the example of studying Coulomb's law / V. Y. Velychko et al. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. Vol. 2871, № 1. P. 012014. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2871/1/012014> (дата звернення: 28.06.2025).
8. Application of cloud computing in the process of professional training of physics teachers / V. Velychko et al. *Educational Technology Quarterly*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.55056/etq.38> (дата звернення: 28.06.2025).
9. W. Wu, A. Tesei, S. Ayer, J. London, Y. Luo and V. Gunji. "Closing the Skills Gap: Construction and Engineering Education Using Mixed Reality – A Case Study". *2018 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*, San Jose, CA, USA, 2018, pp. 1–5, DOI: <https://doi.org/10.1109/FIE.2018.8658992> (дата звернення: 28.06.2025).

REFERENCES:

1. Alatas, F., & Yakin, N. (2021). The Effect of Science, Technology, Engineering, and Mathematics (STEM) Learning on Students' Problem Solving Skill. *JIPF (Jurnal Ilmu Pendidikan Fisika)*, 6(1), 1–9. doi:<http://dx.doi.org/10.26737/jipf.v6i1.1829>
2. Banda, H., & Nzabanimana, J. (2021, December 21). Effect of integrating physics education technology simulations on students' conceptual understanding in physics: A review of literature. *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.*, 17(2), 023108. Retrieved June 28, 2025, from <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.17.023108>
3. Khaeruddin, K., & Bancong, H. (2022). STEM education through PhET simulations: An effort to enhance students' critical thinking skills. *Jurnal Ilmiah Pendidikan Fisika Al-Biruni*, 11(2), 34–45.

4. Lyon, J. A., & Magana, A. J. (2020). A review of mathematical modeling in engineering education. *International Journal of Engineering Education*, 36(1A), 101–116.
5. Papadakis S, KivAE, Kravtsov HM, Osadchyi VV, Marienko MV, Pinchuk OP, Shyshkina MP, Sokolyuk OM, Mintii I S, Vakaliuk T A, Striuk A M and Semerikov S O 2022 Revolutionizing education: using computer simulation and cloud-based smart technology to facilitate successful open learning ed S Papadakis 3358 1-18 CEUR Workshop Proceedings URL <https://ceur-ws.org/Vol-3358/paper00.pdf>
6. Velychko, V. Ye., Fedorenko, E. G., Kaidan, N. V., Kaidan, V. P. (2025) Harnessing immersive technologies for enhancing mathematical logics education in secondary schools. *CEUR Workshop Proceedings*, 3918, с. 70–84.
7. Velychko, V. Y., Kaidan, V. P., Kaidan, N. V., & Fedorenko, O. G. (2024). The use of computer modeling in the educational process based on the example of studying Coulomb's law. *Journal of Physics: Conference Series*, 2871(1), 012014. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2871/1/012014>
8. Velychko, V., Fedorenko, E., Kaidan, N., & Kaidan, V. (2022). Application of cloud computing in the process of professional training of physics teachers. *Educational Technology Quarterly*. <https://doi.org/10.55056/etq.38>
9. Wu, W., Tesei, A., Ayer, S., London, J., Luo, Y., & Gunji, V. (2018, October). Closing the skills gap: Construction and engineering education using mixed reality—A case study. In *2018 IEEE frontiers in education conference (FIE)* (pp. 1–5). IEEE.