

УДК 378.147:622:004.9(075.8)

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-20>

ІНТЕГРАЦІЯ СИМУЛЯЦІЙ ТА МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ У ПІДГОТОВЦІ ФАХІВЦІВ МЕТАЛУРГІЙНИХ 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 гірничої справи

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»,

викладач кваліфікаційної категорії «спеціаліст вищої категорії»

циклової комісії з інженерії програмного забезпечення

Хмельницького фахового економіко-технологічного коледжу

Університету економіки і підприємництва

ORCID ID: 0000-0003-2008-3539

Щенсневич Ольга Володимирівна,

викладач кваліфікаційної категорії «спеціаліст вищої категорії»

циклової комісії з автоматизації металургійного виробництва та механічного обладнання

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

викладач кваліфікаційної категорії «спеціаліст вищої категорії»

Слов'янського фахового коледжу державного некомерційного підприємства

«Державний університет «Київський авіаційний інститут»

ORCID ID: 0009-0001-4801-3666

Щенсневич Юрій Юрійович,

викладач кваліфікаційної категорії «спеціаліст першої категорії»

Слов'янського фахового коледжу державного некомерційного підприємства

«Державний університет «Київський авіаційний інститут»

ORCID ID: 0009-0007-0300-2000

У статті досліджується модернізація викладання природничо-математичних дисциплін для підготовки фахівців металургійного профілю через інтеграцію цифрових симуляцій та математичного моделювання, зокрема, з використанням платформи PhET. Актуальність такого підходу зумовлена необхідністю забезпечення практично орієнтованого навчання, яке дозволяє здобувачам освіти ефективно аналізувати складні технологічні процеси металургійного виробництва та водночас підвищує інтерес до фундаментальних дисциплін, що традиційно сприймаються як абстрактні.

У статті висвітлено особливості металургійної підготовки, що вимагають від студентів не лише теоретичних знань, а й здатності працювати з багатофакторними моделями, передбачати наслідки фізико-хімічних процесів і приймати обґрунтовані технологічні рішення в умовах обмежених ресурсів та високої відповідальності. Наголошено, що ефективність професійної діяльності майбутніх металургів значною мірою визначається розумінням фізичних і математичних основ металургійних технологій.

Методологія дослідження базується на комбінуванні теоретичних методів (аналіз літератури, порівняльне дослідження) та емпіричних (опитування, спостереження, педагогічний експеримент). В експериментальних групах студенти виконували завдання з PhET-симуляцій, моделювали технологічні процеси, аналізували параметричні зміни та їхній вплив на властивості металу. Спостереження продемонстрували зростання активності, ініціативності та аналітичного мислення студентів, а результати опитувань підтвердили позитивне ставлення до такого підходу.

У публікації наведено приклади освітніх кейсів, а також запропоновано практичні рекомендації щодо впровадження симуляцій і моделювання в навчальний процес. Зроблено висновок, що поєднання цифрових

симуляцій і математичного моделювання ефективно сприяє формуванню професійних компетентностей майбутніх металургійних інженерів у сучасному цифровому середовищі освіти.

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

Kaidan Nataliia, Kaidan Vadym, Shchensnevych Olha, Shchensnevych Yurii. Integration of simulations and mathematical modeling in the training of metallurgical specialists: experience and prospects

The article studies the modernisation of natural and mathematical sciences teaching for the metallurgical specialists training through the integration of digital simulations and mathematical modelling, particularly using the PhET platform. The relevance of this approach is based on the need to provide practice-oriented learning that allows students to effectively analyse complex technological processes of metallurgical production and at the same time increases interest in fundamental disciplines that are traditionally perceived as abstract.

The article highlights the specific features of metallurgical training that require students to not only have theoretical knowledge but also the ability to work with multifactorial models, predict the consequences of physical and chemical processes and make evidence-based technological decisions in conditions of limited resources and high responsibility. It is emphasised that the effectiveness of the professional activity of future metallurgists is largely determined by an understanding of the physical and mathematical foundations of metallurgical technologies.

The research methodology is based on a combination of theoretical methods (literature analysis, comparative study) and empirical methods (survey, observation, pedagogical experiment). In the experimental groups, students carried out PhET simulation tasks, modelled technological processes, and analysed parametric changes and their impact on metal properties. Observations showed an increase in students' activity, initiative and analytical thinking, and survey results confirmed a positive response to this approach.

The publication provides examples of educational cases and offers practical recommendations on how to implement simulations and modelling in the educational process. It is concluded that the combination of digital simulations and mathematical modelling effectively contributes to the formation of professional competencies of future metallurgical engineers in the modern digital education environment.

Key words: PhET models, PhET simulators, digital models, physical simulations, visualization, mathematical modeling, metallurgical specialty.

Вступ. Металургійна промисловість посідає стратегічне місце в національній економіці, забезпечуючи ресурсну основу для енергетичного, машинобудівного, будівельного та оборонного секторів. У контексті глобальної цифрової трансформації, автоматизації виробництва, впровадження інтелектуальних систем керування технологічними процесами зростають вимоги до якості професійної підготовки фахівців металургійного профілю. Сучасний інженер-металург має не лише володіти класичними знаннями з технології виплавки та обробки металів, але й демонструвати здатність до системного мислення, аналізу складних виробничих сценаріїв, оптимізації процесів на основі математичного моделювання та використання віртуальних симуляцій. Такий підхід сприяє формуванню компетенцій високого рівня, необхідних для ефективної роботи в умовах індустрії 4.0 і забезпечення конкурентоспроможності випускників на ринку праці.

Ці завдання покладають особливу відповідальність на природничо-математичний складник підготовки інженерів, зокрема на курси фізики, математики, теоретичної механіки, гідродинаміки, термодинаміки тощо. Саме ці дисципліни формують у здобувачів освіти здатність до моделювання теплових, масообмінних і гідромеханічних процесів, що відбуваються

у доменних та мартенівських печах, ливарних системах, прокатних станах і системах охолодження. Глибоке розуміння фізичних закономірностей дає змогу майбутнім фахівцям ефективно аналізувати та оптимізувати ключові технологічні етапи металургійного виробництва.

Однак на практиці викладання цих дисциплін часто супроводжується низкою труднощів: абстрактністю теоретичного матеріалу, недостатнім зв'язком із реальними технологічними процесами металургійного виробництва, обмеженими можливостями традиційних засобів візуалізації. Це призводить до зниження зацікавленості здобувачів освіти та ускладнює формування фахових компетентностей, необхідних для роботи в умовах сучасної металургії. У такому контексті особливої цінності набувають цифрові освітні інструменти, що дають змогу створювати динамічні моделі технологічних явищ, варіювати параметри процесів, досліджувати багатофакторні залежності та спостерігати їхній вплив у реальному часі [2].

Один з ефективних та доступних шляхів удосконалення навчального процесу є використання інтерактивних симуляцій, зокрема середовища PhET Interactive Simulations (University of Colorado Boulder), яке дозволяє студентам спостерігати фізичні явища в динаміці, проводити умовні експерименти та формувати практичне

розуміння природничих закономірностей. У поєднанні з математичним моделюванням – методом опису, прогнозування та оптимізації фізико-технічних процесів – ці симуляції створюють передумови для оновлення змісту та методики викладання природничо-математичних дисциплін, орієнтованих на підготовку фахівців металургійної галузі.

Стаття присвячена аналізу можливостей і практичних аспектів інтеграції симуляцій PhET та методів математичного моделювання в освітній процес для майбутніх інженерів-металургів. У роботі розглянуто дидактичні переваги такого підходу, наведено приклади його впровадження в навчальну практику, а також окреслено перспективи розвитку цифрових технологій у контексті сучасної інженерної освіти.

Методи та методики дослідження. У ході дослідження було використано сукупність взаємодоповнюючих наукових методів, що дозволили глибоко вивчити процес інтеграції математичного моделювання та цифрових симуляцій у підготовку майбутніх інженерів металургійного напрямку. Першим етапом стало опрацювання науково-методичних джерел, присвячених особливостям викладання природничо-математичних дисциплін, інженерній дидактиці та сучасним цифровим підходам у технічній освіті, що дозволило сформулювати чітке уявлення про ключові напрями дослідження.

Метод порівняльного аналізу був застосований для оцінювання різниці між традиційними формами навчання та сучасними інтерактивними підходами з точки зору мотивації студентів, якості засвоєння знань та їх прикладного використання у професійній сфері. У процесі розробки навчальних сценаріїв були створені кейсові завдання, що поєднували цифрові симуляції PhET із математичним аналізом характерних для металургійного виробництва процесів, що дозволило визначити їхню педагогічну ефективність.

Результати. Аналіз науково-методичних джерел засвідчив, що актуальні тенденції у викладанні природничо-математичних дисциплін для студентів технічного профілю все більше орієнтовані на впровадження візуалізованих і практично спрямованих методик. У численних публікаціях підкреслюється необхідність не лише формування ґрунтовної теоретичної бази, а й розвитку прикладних навичок, безпосередньо пов'язаних із майбутньою професією. Такий підхід особливо важливий у підготовці спеціалістів у галузі металургії, де прорахунок у фізико-математичних розрахунках або недостатнє розуміння закономірностей теплових

процесів може спричинити збої у виробництві, пошкодження обладнання або створити ризики техногенного характеру.

Аналіз наукових джерел засвідчив, що одним із ключових векторів оновлення методики викладання є впровадження інструментів STEM-освіти, які інтегрують теоретичні знання з елементами інженерної діяльності, експериментальної роботи та цифрових технологій. У своєму дослідженні Khaeruddin і Bongsong (2022) підкреслюють, що застосування симуляцій PhET у STEM-орієнтованому навчанні суттєво сприяє розвитку критичного мислення студентів завдяки ефектній візуалізації фізичних явищ, інтерактивному підходу та можливості проводити дослідження у безпечному віртуальному середовищі [4].

У своїй роботі Alatas і Yakin (2021) демонструють, що впровадження STEM-методики з використанням симуляцій PhET у темі «Робота та енергія» суттєво підвищує рівень умінь учнів у розв'язанні задач. Проведений квазіексперимент за участю 70 десятикласників показав, що середній приріст навчальних результатів у групі, де застосовували STEM-підхід разом із PhET, склав 0,71, тоді як у контрольній групі – лише 0,38. Це свідчить про значне покращення проблемно орієнтованих навичок у результаті використання інтерактивних симуляцій [1].

У дослідженні Joseph A. Lyon та Alejandra J. Magana (2020) представлено систематичний огляд публікацій, присвячених застосуванню математичного моделювання в інженерній освіті. Проаналізувавши низку наукових робіт, автори зосереджують увагу на стратегіях, які використовують здобувачі освіти, особливостях педагогічної реалізації моделювання та методах оцінювання відповідних навчальних активностей. У роботі наголошується, що математичне моделювання виступає важливим інструментом формування здатності до розв'язання складних, слабо структурованих задач, характерних для професійної діяльності інженера [5].

У рамках застосування методу порівняльного аналізу було здійснено зіставлення ефективності традиційного викладання природничо-математичних дисциплін із сучасними освітніми підходами, що включають використання симуляцій PhET та математичного моделювання. Аналіз показав, що традиційна подача навчального матеріалу здебільшого сприяє репродуктивному засвоєнню знань, тоді як інтерактивні інструменти забезпечують формування глибшого концептуального розуміння, підвищення мотивації та активну включеність здобувачів освіти в навчальний процес.

Особливо це актуально для підготовки фахівців у галузі металургії, де важливим є не лише знання фізичних і математичних основ процесів, а й уміння застосовувати їх для аналізу, моделювання й оптимізації технологічних операцій, таких як виплавка, прокатка чи термообробка. Встановлено, що здобувачі освіти, які працюють із цифровими симуляціями та залучаються до розв'язання задач на основі моделювання, краще розуміють взаємозв'язки між фізичними законами та реальними виробничими ситуаціями в металургійному виробництві. Це дозволяє зробити висновок, що інтерактивні підходи до навчання мають вищу ефективність у формуванні професійних компетентностей, ніж традиційно орієнтовані методи [7].

Сучасне металургійне виробництво потребує від фахівців не лише теоретичних знань, а й глибокого розуміння фізичних процесів, що відбуваються в металах і сплавах під час нагрівання, охолодження, плавки та обробки. Використання інтерактивних симуляцій відкриває нові можливості для навчання студентів металургійних спеціальностей. Вони дозволяють моделювати складні процеси у безпечному та контрольованому середовищі, спостерігати зміни температури, фаз, об'ємів та властивостей металів, не потребуючи дорогого обладнання. Симуляції стимулюють інтерес студентів, дозволяють відчувати причинно-наслідкові зв'язки між явищами та формувати практичні навички прогнозування технологічних результатів [6]. Завдяки візуалізації процесів, які важко побачити в реальних умовах, здобувачі освіти швидше засвоюють матеріал, краще розуміють взаємозв'язок фізики і металургії та можуть експериментально досліджувати вплив різних параметрів на якість металу. Таким чином, симуляції стають потужним інструментом сучасної освіти металургів, поєднуючи знання, практику та інноваційний

досвід. Розглянемо декілька прикладів таких симуляцій, використання яких враховує специфіку металургійного виробництва.

Симуляція «States of Matter: Basics» [10] дозволяє студентам наочно спостерігати, як речовина переходить між твердим, рідким і газоподібним станами залежно від зміни температури та тиску. Для здобувачів освіти металургійних напрямів це особливо цінно, оскільки для цього напряму ключовими є процеси плавки, кристалізації та термічної обробки металів і сплавів. Візуалізація фазових переходів допомагає студентам зрозуміти різницю між структурними станами металів, простежити залежність фазових переходів від температури, сформувати інтуїтивне уявлення про енергію, необхідну для плавлення та кипіння, підготуватися до лабораторних робіт та досліджень, що стосуються питань нагрівання та охолодження матеріалів, наочно порівняти поведінку різних речовин, що сприяє кращому розумінню сплавів та легування металів.

Симуляція інтерактивна: студенти можуть змінювати температуру, спостерігати за рухом частинок і отримувати миттєвий зворотний зв'язок. Це значно підвищує ефективність навчання, особливо під час пояснення абстрактних понять термодинаміки та кінетики фазових процесів.

Дану симуляцію можна інтегрувати в навчальний сценарій заняття під час проведення як лекційного заняття, так і лабораторної роботи. Під час лекції, після вступу (коротко пояснити, що таке тверда, рідка та газоподібна фаза речовини, навести приклади металів у різних станах), проводиться демонстрація симуляції (викладач вмикає симуляцію на проекторі або демонструє на екрані, змінює температуру і показує перехід речовини між фазами, коментуючи рух частинок, температуру плавлення та кипіння), після чого відбувається інтерактивне

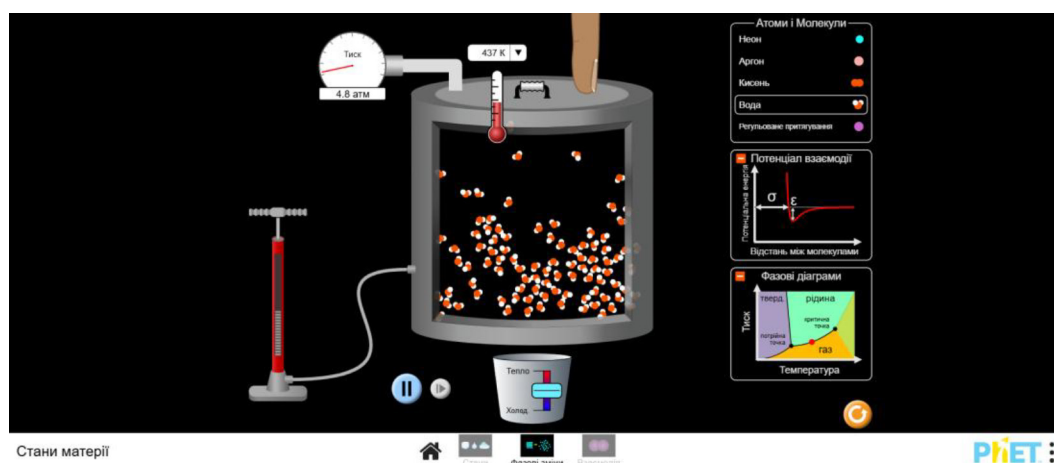


Рис. 1. Приклад використання симуляції «States of Matter: Basics»

обговорення (студенти передбачають, як зміниться стан речовини при нагріванні / охолодженні сплавів із різними компонентами; розглядають, як ці процеси впливають на структуру металу). Після цього йде підсумок (формулювання ключових висновків про фазові переходи, енергетичні зміни та застосування у металургії) та перехід до наступного питання.

Під час лабораторного заняття здобувачі освіти індивідуально або в парах працюють із симуляцією на власних пристроях. Вони виконують серію завдань: визначити температуру плавлення для конкретної речовини, простежити, як зміна кількості частинок впливає на енергію системи, моделюють швидкість переходу між фазами. Записують спостереження в таблицю та роблять висновки щодо практичного застосування у виробничих процесах, наприклад у литті чи термічній обробці. Наприкінці проходить обговорення результатів із викладачем і порівняння з теоретичними даними металургійних таблиць фазових діаграм.

Таким чином, симуляція забезпечує інтерактивне навчання, поєднує теоретичні знання з візуальними експериментами та сприяє глибшому розумінню металургійних процесів, мінімізуючи витрати часу та матеріалів.

Симуляція «Energy Forms and Changes» [9] дозволяє студентам наочно спостерігати, як енергія переходить між різними формами – кінетичною, потенційною, внутрішньою, хімічною та тепловою. Для здобувачів металургійних спеціальностей це надзвичайно важливо, оскільки в металургії більшість технологічних процесів пов'язані з перетворенням енергії: плавка металів, термічна обробка, механічне прокатування та деформація. Використання симуляції дає низку переваг: дозволяє візуалізувати перетворення енергії, що відбуваються у металургійних

печах і робочих механізмах; демонструє залежність кінетичної, потенційної та внутрішньої енергії від змін умов, що допомагає зрозуміти витрати енергії на плавку та нагрівання металів; дає змогу аналізувати ефективність енергетичних процесів у виробництві металів і сплавів; сприяє формуванню інтуїтивного розуміння закону збереження енергії та її перетворень у практичних металургійних процесах; забезпечує безпечну демонстрацію складних процесів, які у виробництві відбуваються за високих температур і під тиском.

Симуляція інтерактивна: студенти можуть «додавати» або «віднімати» енергію, змінювати типи енергії, спостерігати графічне зображення процесів перетворення енергії. Це дозволяє робити абстрактні поняття фізики наочними та зрозумілими, що підвищує ефективність навчання.

У лекційні заняття цю симуляцію можна інтегрувати за таким сценарієм. Після вступу (коротко пояснити основні форми енергії, принцип збереження енергії та її роль у металургійних процесах) використовуємо симуляцію й показуємо, як енергія переходить з потенційної у кінетичну, теплову та внутрішню, коментуючи приклади із плавки, нагрівання та деформації металів. Потім проводимо інтерактивне обговорення, під час якого студенти прогнозують результати перетворень енергії у разі зміни умов, наприклад у разі швидкого нагрівання або ударної деформації металу, порівнюють із реальними процесами. Потім – підсумок (формулювання ключових висновків щодо енергетичних процесів у металургії та їх ефективності) та перехід до наступного питання.

Для лабораторного заняття розглядаємо інший варіант сценарію. Здобувачі освіти працюють із симуляцією індивідуально або

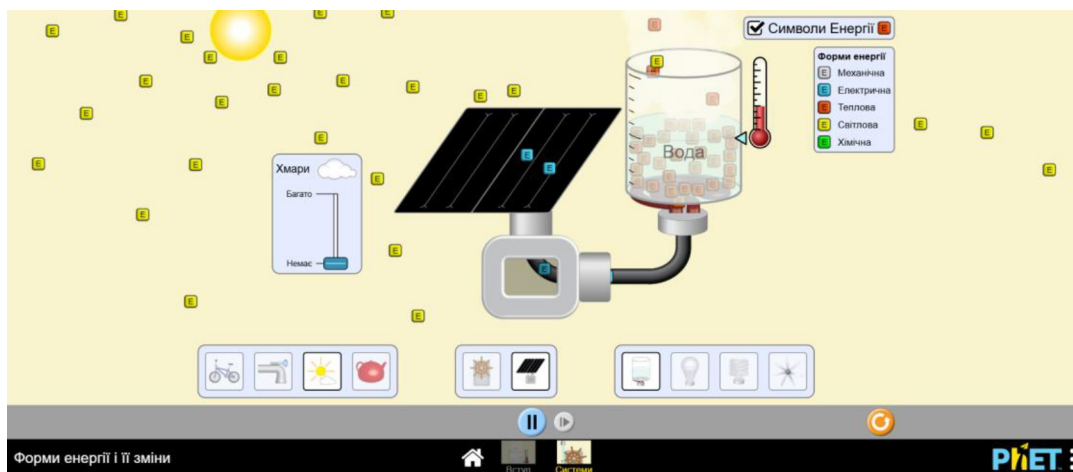


Рис. 2. Приклад використання симуляції «Energy Forms and Changes»

в парах. Виконують завдання: моделюють перетворення енергії в різних умовах, визначають, яка частина енергії витрачається на нагрівання, деформацію або рух. Записують спостереження у таблицю та будують графіки зміни енергії різних форм. Наприкінці – обговорення результатів із викладачем, порівняння з теоретичними даними металургійних процесів, аналіз ефективності використання енергії.

Таким чином, симуляція забезпечує інтерактивне навчання, поєднує теорію з практичними моделями перетворення енергії та допомагає студентам краще зрозуміти фундаментальні фізичні закони у контексті металургійного виробництва.

Симуляція «Density» [8] дозволяє здобувачам освіти наочно визначати густину різних речовин, порівнювати їх і спостерігати вплив маси та об'єму на цей показник. Для студентів металургійних напрямів це критично важливо, адже густина є ключовим параметром у виборі металів і сплавів для різних виробничих цілей – від лиття та прокатки до розрахунку міцності конструкцій. Використання симуляції надає такі переваги: дозволяє інтерактивно досліджувати залежність густини від маси та об'єму матеріалу; демонструє відмінності між легкими та важкими металами, а також між чистими металами і сплавами; сприяє формуванню розуміння принципів легування та проектування матеріалів із заданими властивостями; дозволяє здобувачам освіти проводити «віртуальні експерименти» без потреби у дорогих або небезпечних металах; допомагає візуалізувати абстрактні концепції, що підвищує ефективність запам'ятовування і розуміння теорії.

Симуляція інтерактивна: студенти можуть змінювати масу та об'єм об'єкта, спостерігати, як змінюється густина, а також порівнювати різні речовини, що дозволяє моделювати процеси вибору матеріалів у металургії.

У лекційне заняття цю симуляцію можна інтегрувати в такий спосіб. Після вступу (пояснення фізичної величини «густина», її формули та значення для металургії) проводимо демонстрацію симуляції: викладач показує, як змінюється густина у разі зміни маси або об'єму, порівнює різні матеріали, коментує практичні приклади, такі як лиття, прокатка, вибір матеріалу для конструкцій. Далі йде інтерактивне обговорення щодо прогнозування того, як густина впливає на властивості сплавів і їх застосування, розглядається, чому деякі метали легші чи важчі за інші і як це враховується у виробництві. Завершенням є підбиття підсумків – формулювання ключових висновків щодо густини та її ролі у металургійних процесах і виборі матеріалів.

На лабораторному занятті здобувачі освіти працюють із симуляцією індивідуально або в парах, виконують завдання: визначають густину різних речовин, порівнюють густину різних матеріалів, досліджують вплив об'єму та маси на густину. Записують результати в таблицю, будують графіки та роблять висновки щодо практичного застосування, наприклад, у виборі сплавів для лиття або обробки під тиском. Проводять обговорення результатів із викладачем та порівняння з реальними даними, аналіз відмінностей між теоретичними і практичними показниками. Таким чином, симуляція забезпечує інтерактивне навчання, допомагає зрозуміти важливі фізичні властивості матеріалів і їх практичне застосування у металургії, поєднуючи теорію з наочними моделями.

У межах дослідження було проведено педагогічний експеримент, спрямований на оцінку ефективності впровадження інтерактивних методичних рішень у викладання фізики та механіки для здобувачів освіти металургійного профілю. Експериментальна частина полягала в цілеспрямованій інтеграції симуляцій PhET та

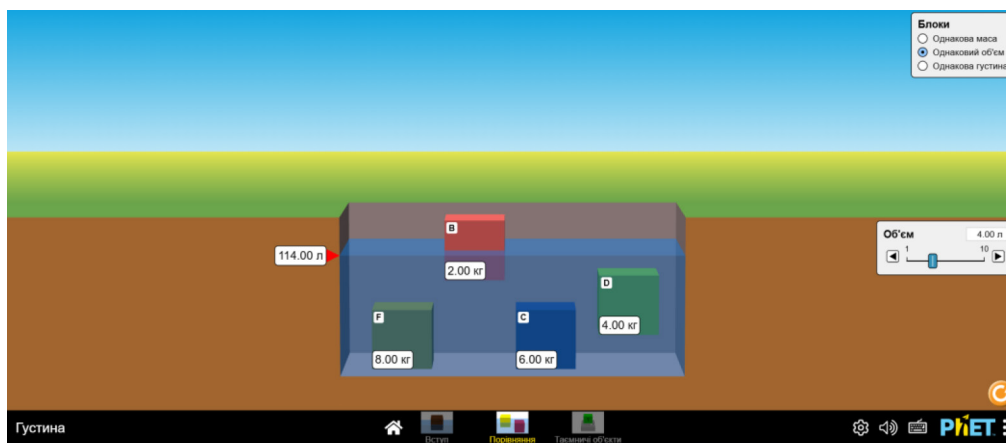


Рис. 3. Приклад використання симуляції «Density»

завдань із математичного моделювання у структуру занять, які раніше проводилися у традиційному форматі [7]. Особлива увага приділялася темам, що безпосередньо пов'язані з реальними металургійними процесами, такими як фазові переходи, теплообмін, зміни форм енергії, та поясненню фізичної величини «густина», що дало змогу забезпечити вищий рівень прикладного осмислення матеріалу.

Особливий акцент у дослідженні було зроблено на формуванні таких складників професійної компетентності, як уміння інтерпретувати модель у контексті металургійних процесів, обґрунтовувати вибір змінних і параметрів, оцінювати похибки та робити висновки на основі результатів моделювання. У процесі експерименту фіксувалися позитивні зміни в діяльності студентів: підвищення навчальної активності, зростання кількості запитань, поглиблення рівня міркувань, а також покращення результатів під час виконання прикладних практичних завдань, пов'язаних із металургійною тематикою.

Таким чином, педагогічний експеримент дозволив апробувати ефективність інтегрованого підходу в умовах реального навчального процесу, підтвердивши його результативність у розвитку аналітичного мислення, інженерної уяви та професійно орієнтованих умінь, необхідних для успішної діяльності в сучасній металургії.

Спостереження за навчальною активністю здійснювалося під час занять і полягало у фіксації рівня залученості студентів до виконання завдань, кількості звернень до викладача, ініціативності у побудові моделей та активності під час обговорення отриманих результатів. Було зафіксовано, що студенти, які працювали з інтерактивними симуляціями, виявляли вищий рівень самостійності у прийнятті рішень, демонстрували глибший інтерес до вивчення фізичних процесів, зокрема тих, що мають безпосередній стосунок до металургійного

виробництва, та частіше застосовували набуті знання для пояснення прикладних ситуацій.

Аналіз зворотного зв'язку показав, що більшість опитаних студентів вважають цифрові симуляції ефективним інструментом для кращого засвоєння матеріалу, особливо тем, які стосуються складних, абстрактних або динамічних явищ, типових для металургійних процесів. Вони зазначили, що інтерактивна робота з моделями сприяє більш швидкому й глибокому розумінню суті фізичних закономірностей. Отримані результати підтвердили дидактичну доцільність використання симуляцій PhET у поєднанні з математичним моделюванням у курсах природничо-математичної підготовки майбутніх фахівців металургійної галузі.

Висновки. Отримані в ході дослідження результати доводять, що поєднання цифрових симуляцій PhET і математичного моделювання у викладанні природничо-математичних дисциплін для студентів металургійних спеціальностей є обґрунтованим як із педагогічної, так і з технологічної точки зору. Такий формат навчання сприяє зростанню зацікавленості у вивченні предметів, активізує аналітичне мислення, поглиблює розуміння навчального матеріалу та формує прикладні компетенції, які необхідні для успішної професійної діяльності в металургійній галузі. Результати порівняльного аналізу, дані педагогічного експерименту та висновки, зроблені на основі анкетування студентів, засвідчили ефективність інтеграції візуальних моделей і кількісного аналізу в навчальний процес. Застосування такого підходу дозволяє не лише зробити освітній процес більш динамічним і практико-орієнтованим, але й сприяє розвитку критично важливих для майбутніх металургів умінь: системного мислення, навичок побудови та аналізу математичних моделей, а також прийняття технічно обґрунтованих рішень у виробничих умовах.

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, no. 1. P. 1. <https://doi.org/10.26737/jipf.v6i1.1829> (дата звернення: 25.08.2025).
2. Application of cloud computing in the process of professional training of physics teachers / V. Velychko et al. *Educational Technology Quarterly*. 2022. <https://doi.org/10.55056/etq.38> (дата звернення: 25.08.2025).
3. Harnessing immersive technologies for enhancing mathematical logics education in secondary schools / Y. Velychko et al. *CEUR Workshop Proceedings*. 2025. No. 3918. P. 70–84.
4. 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, no. 1. P. 35–45. <https://doi.org/10.24042/jipfalbiruni.v11i1.10998> (дата звернення: 25.08.2025).
5. 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.

6. 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, no. 1. P. 012014. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2871/1/012014> (дата звернення: 25.08.2025).

7. Інтеграція симуляцій та математичного моделювання у підготовці фахівців гірничих спеціальностей: досвід і перспективи / Кайдан Н. В., Кайдан В. П., Грудкіна Н. С., Величко В. Є., Федоренко О. Г. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія «Технічні науки»*. 2025. № 4. С. 307–315.

8. Симуляція «Density». URL: https://phet.colorado.edu/sims/html/density/latest/density_all.html?locale=uk (дата звернення: 25.08.2025).

9. Симуляція «Energy Forms and Changes». URL: https://phet.colorado.edu/sims/html/energy-forms-and-changes/latest/energy-forms-and-changes_all.html?locale=uk (дата звернення: 25.08.2025).

10. Симуляція «States of Matter: Basics». URL: https://phet.colorado.edu/sims/html/states-of-matter/latest/states-of-matter_all.html?locale=uk (дата звернення: 25.08.2025).

REFERENCES:

1. Alatas, F., & Yakin, N. A. (2021). The effect of science, technology, engineering, and mathematics (STEM) learning on students' problem solving skill. *JIPF (Jurnal Ilmu Pendidikan Fisika)*, 6(1), 1. <https://doi.org/10.26737/jipf.v6i1.1829>

2. Velychko, V., et al. (2022). Application of cloud computing in the process of professional training of physics teachers. *Educational Technology Quarterly*. <https://doi.org/10.55056/etq.38>

3. Velychko, Y., et al. (2025). Harnessing immersive technologies for enhancing mathematical logics education in secondary schools. *CEUR Workshop Proceedings*, 3918, 70–84.

4. 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(1), 35–45. <https://doi.org/10.24042/jipfalbiruni.v11i1.10998>

5. Lyon, J. A., & Magana, A. J. (2020). A review of mathematical modeling in engineering education. *International Journal of Engineering Education*, 36(1), 101–116.

6. Velychko, V. Y., et al. (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>

7. Kaidan, N. V., Kaidan, V. P., Hrudkina, N. S., Velychko, V. Ye., & Fedorenko, O. H. (2025). Intehratsiia symuliatsii ta matematychnoho modeliuvannia u pidhotovtsi fakhivtsiv hirnychykh spetsialnostei: dosvid i perspektyvy [Integration of simulations and mathematical modeling in the training of mining specialists: experience and prospects]. *Naukovyi zhurnal Metinvest Politekhniky. Seriya: Tekhnichni nauky – Scientific Journal of Metinvest Polytechnic. Series: Technical Sciences*, 4, 307–315 [in Ukrainian].

8. PhET Interactive Simulations. (n. d.). *Density*. University of Colorado Boulder. Retrieved from: https://phet.colorado.edu/sims/html/density/latest/density_all.html?locale=uk

9. PhET Interactive Simulations. (n.d.). *Energy Forms and Changes*. University of Colorado Boulder. Retrieved from: https://phet.colorado.edu/sims/html/energy-forms-and-changes/latest/energy-forms-and-changes_all.html?locale=uk

10. PhET Interactive Simulations. (n.d.). *States of Matter: Basics*. University of Colorado Boulder. Retrieved from: https://phet.colorado.edu/sims/html/states-of-matter/latest/states-of-matter_all.html?locale=uk

Стаття надійшла: 20.08.2025

Стаття прийнята: 19.09.2025

Опублікована: 10.11.2025

