

**Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний педагогічний університет
імені Володимира Гнатюка**

**Фізико-математичний факультет
Кафедра інформатики та методики її навчання**

**Кваліфікаційна робота
МЕТОДИКА ВИКОРИСТАННЯ 3D ГРАФІКИ ДЛЯ ВПРОВАДЖЕННЯ
STEM-ОСВІТИ**

**Спеціальність 014 Середня освіта
Освітня програма
«Середня освіта (Інформатика, математика, STEM-освіта)»**

**Здобувача другого (магістерського)
рівня вищої освіти
Хомута Тараса Олеговича**

**НАУКОВИЙ КЕРІВНИК:
кандидат педагогічних наук, доцент
Лещук Світлана Олексіївна**

**РЕЦЕНЗЕНТ:
кандидат педагогічних наук,
доцент кафедри інформаційних
технологій і програмування
УДУ імені Михайла Драгоманова
Твердохліб Ігор Анатолійович**

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ВИКОРИСТАННЯ АНІМАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ У НАВЧАННІ	6
1.1. Педагогічний потенціал анімаційних моделей у процесі навчання	9
1.2. Роль анімацій у формуванні міжпредметних зв'язків	11
1.3. Переваги інтеграції Blender 3D у навчальний процес	13
1.4 Психолого-педагогічні особливості сприйняття тривимірної візуалізації та інтерактивного моделювання учнями	15
Висновок до розділу 1	17
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА АНІМАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ФІЗИЧНИХ ЯВИЩ	19
2.1. Методичні засади та програмно-технічне забезпечення розробки інтерактивних навчальних моделей	19
2.2. Створення моделі динамометра	22
2.3. Створення моделі дошки Гальтона	30
2.4. Розширення типології віртуальних моделей	35
Висновки до розділу 2	36
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА МЕТОДИКИ	38
3.1. Мета, завдання та гіпотеза експерименту	38
3.2. Діагностика початкового рівня знань учнів	39
3.3. Організація дослідження, методи та критерії ефективності	41
3.4. Аналіз та інтерпретація результатів експерименту	43
Висновки до розділу 3	48
ВИСНОВКИ	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	52
ДОДАТКИ	57

ВСТУП

Інтеграція Blender 3D у навчальний процес відкриває нові підходи до вивчення математики та статистики, адже за допомогою цього програмного середовища можна наочно відтворювати абстрактні поняття у вигляді динамічних тривимірних моделей, що робить навчання більш зрозумілим і захоплюючим для учнів. Такий підхід підвищує інтерес до вивчення математики та статистики, сприяє розвитку логічного мислення, просторової уяви й дослідницьких навичок.

Використання Blender 3D в освітньому процесі є актуальним напрямом модернізації навчання, адже воно дозволяє створювати динамічні та наочні візуалізації фізичних процесів, сприяючи глибшому розумінню навчального матеріалу й розвитку творчого та інженерного мислення учнів. Навіть у малозабезпечених школах, де ресурси можуть бути обмежені, учні отримують можливість працювати з потужним інструментом для створення 3D-моделей та анімацій. Крім того, це ідеально підходить для дистанційного навчання, коли учні з будь-якого куточку світу можуть вивчати складні наукові концепції в інтерактивній формі, що особливо актуально в умовах глобальних викликів.

У сучасних освітніх умовах дедалі більшої важливості набувають інтегровані підходи до навчання, що забезпечують підготовку учнів до життя в цифровому та технологічному суспільстві. STEAM-освіта, як модель інтеграції природничо-наукових дисциплін з мистецтвом і математикою, сприяє розвитку критичного мислення, креативності та технічних навичок. Застосування 3D-моделювання, зокрема у Blender, дозволяє зробити навчальний процес практичним, візуально привабливим і технологічно актуальним.

Метою роботи є дослідження можливостей використання 3D-моделювання для формування STEM-навичок учнів середніх класів на прикладі навчальних моделей з фізики і математики

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати використання 3D-моделей у навчальному процесі.

2. Вивчити інструментарій середовища Blender для моделювання фізичних та математичних пристроїв.
3. Розробити методичні матеріали із використанням розроблених моделей.
4. Експериментально перевірити ефективність реалізації запропонованого підходу у STEM-освіті.

Об'єктом дослідження є процес візуалізації фізичних, статистичних та ймовірнісних процесів у STEM-освіті.

Предмет дослідження - використання середовища Blender як засобу формування STEM-компетентностей.

Результати даного дослідження можуть бути корисними для вчителів фізики, математики та інформатики, учнів і всіх зацікавлених в галузях фізики та 3D моделювання.

Структура. Робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків до розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків.

РОЗДІЛ 1. ВИКОРИСТАННЯ АНІМАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ У НАВЧАННІ

Сучасний етап розвитку суспільства, позначений стрімкою цифровізацією всіх сфер життя та глобальними технологічними змінами, висуває якісно нові вимоги до системи освіти [9, 10, 17]. Економічні та соціальні виклики сьогодення диктують потребу у формуванні випускника нового покоління — особистості, яка володіє не лише фундаментальними академічними знаннями, а й навичками критичного мислення, креативності, командної взаємодії та цифрової грамотності [12, 13, 22]. Відповіддю на ці потреби стає активне впровадження STEM-освіти (Science, Technology, Engineering, Mathematics) — інтегративного підходу, що об'єднує природничі науки, технології, інженерію та математику в єдину дидактичну систему, орієнтовану на вирішення практичних проблем [2, 4, 11, 26].

Важливе місце в архітектурі сучасної освіти посідає тривимірне моделювання, яке виступає потужним інструментом візуалізації абстракцій та розвитку просторового інтелекту [1, 8, 27, 36]. У цьому контексті особливої уваги заслуговує програмне середовище Blender 3D — професійний, багатофункціональний інструмент із відкритим вихідним кодом [18, 20, 34, 39]. Його використання в навчальному процесі дозволяє трансформувати учня з пасивного споживача інформації в активного творця, надаючи можливість не лише опанувати технічні аспекти комп'ютерної графіки, а й заглибитися в сутність фізичних та математичних законів через їх наочне відтворення [7, 25, 29].

Така ситуація породжує дидактичне протиріччя між необхідністю формування в учнів глибокого, системного розуміння фізичних та математичних закономірностей і обмеженими можливостями їх наочного представлення традиційними засобами [5, 7, 8, 25]. Це, у свою чергу, актуалізує пошук новітніх інструментів та методик, здатних не лише полегшити сприйняття складного навчального матеріалу, а й забезпечити формування в учнів цілісної наукової картини світу через активну пізнавальну діяльність, дослідження та творчість [4, 11, 13, 19, 22].

Дане дослідження присвячене розробці та впровадженню методики використання 3D-моделювання на уроках фізики та математики як ефективного засобу формування ключових STEAM-компетентностей [1, 18, 27, 29]. Практична складова роботи реалізована через створення інтерактивних моделей, адаптованих для навчального процесу

1. Модель динамометра - для візуалізації фізичних сил, закону Гука та проведення віртуальних лабораторних робіт.
2. Модель дошки Гальтона - для наочної демонстрації стохастичних процесів, статистичного розподілу та закономірностей теорії ймовірностей.

Залучення школярів до процесу проєктування таких об'єктів дозволяє реалізувати принципи діяльнісного підходу: учні досліджують будову приладів, встановлюють міждисциплінарні зв'язки, розвивають алгоритмічне та інженерне мислення [13, 16, 22, 34, 36]. Такий формат роботи сприяє глибокому розумінню теоретичного матеріалу та формуванню навичок розв'язання прикладних задач [4, 23].

Таким чином, інтеграція інструментарію Blender 3D у шкільну освіту є актуальним кроком, що не лише модернізує зміст навчання, а й створює сприятливі умови для всебічного інтелектуального розвитку особистості [1, 18, 20, 39]. Це повною мірою відповідає пріоритетам концепції Нової української школи (НУШ) та запитам сучасного світу на підготовку гнучких, технологічно освічених та креативних фахівців [9, 12, 15, 17].

Одним із найбільш перспективних векторів модернізації природничо-математичної освіти (STEM) та реалізації компетентнісного підходу є впровадження технологій комп'ютерного моделювання та тривимірної (3D) анімації [1, 18, 27, 36]. Цей розділ присвячено комплексному теоретичному аналізу феномену анімаційних моделей як потужного засобу навчання, що дозволяє подолати когнітивні бар'єри при вивченні невидимих фізичних процесів, мікросвіту, астрономічних явищ та абстрактних математичних залежностей [5, 8, 25, 29, 40].

У структурі розділу послідовно розкриваються психолого-педагогічні механізми впливу динамічної візуалізації на процес засвоєння знань [8, 13, 20]. Обґрунтовується теза про те, що анімаційна модель виступає своєрідним когнітивним мостом між абстрактно-логічним мисленням (формули, закони) та наочно-образним сприйняттям [5, 25, 36]. На відміну від статичного зображення, анімація дозволяє керувати часовими параметрами процесу, демонструвати причинно-наслідкові зв'язки в розвитку, акцентувати увагу на ключових етапах явища, що значно підвищує ефективність інтеріоризації нових знань [29, 35, 40].

Особливий акцент у розділі зроблено на ролі анімації у встановленні міжпредметних зв'язків та формуванні системного мислення [29, 36, 40]. Розглядається концепція STEM-освіти, де 3D-моделювання виступає інтегруючим фактором, що об'єднує знання з фізики (зміст процесу), математики (розрахунок параметрів), інформатики (програмна реалізація) та мистецтва (візуальне оформлення) [1, 29, 36]. Такий підхід дозволяє подолати фрагментарність знань учнів і продемонструвати єдність наукових принципів на практиці [4, 11, 22].

Окрему та значну увагу в структурі розділу приділено аналізу дидактичних можливостей професійного програмного середовища Blender 3D [18, 20, 27, 39]. Здійснюється порівняльний аналіз використання готових цифрових продуктів (симуляцій, відеороликів) та залучення учнів до процесу безпосереднього створення віртуальних моделей [19, 23, 37]. Обґрунтовується, що саме перехід учня з позиції пасивного споживача цифрового контенту в позицію його активного творця (розробника) є ключовим фактором розвитку інженерних, алгоритмічних та дослідницьких компетентностей [13, 16, 34, 36].

Процес створення анімаційної моделі в середовищі Blender розглядається як форма навчально-дослідницької діяльності, що вимагає від учня глибокого розуміння фізичної суті модельованого явища [19, 23, 25]. Адже для того, щоб коректно налаштувати фізичну симуляцію (наприклад, роботу пружини в динамометрі або рух кульок у дошці Гальтона), учень повинен оперувати

точними фізичними параметрами та математичними законами [14, 29, 34]. Таким чином, технологія 3D-моделювання стає не просто засобом ілюстрації, а інструментом пізнання та верифікації теоретичних знань [1, 36].

У розділі також аналізуються переваги віртуального експерименту, який дозволяє моделювати ідеальні умови, проводити досліди, що є неможливими або небезпечними в реальному житті, та миттєво візуалізувати результати зміни вхідних параметрів [7, 8, 25]. Теоретичні положення, викладені в цьому розділі, формують методологічну базу дослідження та слугують фундаментом для подальшої розробки методики та її експериментальної перевірки, що буде детально висвітлено у наступних частинах роботи [4, 11].

1.1. Педагогічний потенціал анімаційних моделей у процесі навчання

Анімаційні моделі як інноваційний засіб візуалізації складних понять мають надзвичайно високий педагогічний потенціал, що зумовлено необхідністю модернізації освітніх підходів в умовах цифрового суспільства [8, 36, 40]. У сучасній школі учні все частіше стикаються із суттєвими когнітивними труднощами під час опанування абстрактних теорій чи прихованих від безпосереднього спостереження процесів [5, 25]. Йдеться про такі явища, як невидима дія електромагнітних полів, мікроскопічні біологічні механізми клітинного поділу, динаміка хімічних реакцій на молекулярному рівні або складні математичні залежності у багатовимірному просторі [7, 29]. Традиційні дидактичні засоби пояснення — статичний текст підручника, двовимірні схеми на дошці чи сухі математичні формули — нерідко виявляються недостатніми для формування цілісного уявлення про об'єкт вивчення, оскільки вони не передають часової динаміки та просторової глибини [1, 20]. Саме тому критично актуальним стає впровадження анімаційних моделей, які органічно поєднують у собі високу наочність, можливість відтворення руху та інтерактивну взаємодію, що дозволяє подолати бар'єр між абстрактною теорією та її емпіричним сприйняттям [18, 35].

Анімаційна модель у сучасному розумінні — це не просто рухома картинка, а комплексне динамічне візуальне представлення об'єкта або процесу, яке надає унікальну можливість керувати часовими параметрами: демонструвати явища в реальному часі, сповільнювати швидкоплинні процеси (наприклад, момент зіткнення тіл) або пришвидшувати повільні зміни (еволюційні процеси) [5, 8, 29, 40]. Такі моделі можуть бути технічно реалізовані як у форматі лінійних відеодемонстрацій, так і у вигляді повноцінних інтерактивних 3D-сцен, де користувач отримує свободу дій: може обертати об'єкт, змінювати ракурс огляду, масштабувати деталі та коригувати вхідні параметри симуляції [1, 18, 20, 34]. У навчальному процесі такий підхід дає змогу суттєво зменшити рівень абстракції інформації та активізувати когнітивну діяльність учнів завдяки синергетичному ефекту — одночасному залученню зорового (візуалізація), моторного (керування моделлю) та логічного (аналіз наслідків) каналів сприйняття [13, 22, 35, 36].

Окреме і важливе місце в цьому арсеналі посідають 3D-анімації, розроблені у професійному програмному середовищі Blender 3D [18, 20, 39]. Цей інструмент виходить далеко за межі простого художнього моделювання, дозволяючи не лише створювати геометрію об'єктів, а й програмувати їхню складну поведінку в часі, налаштовувати взаємодію матеріалів та створювати фізично коректні симуляції на основі вбудованих математичних алгоритмів [25, 34, 39]. Наприклад, візуалізація пружної деформації пружини в динамометрі або симуляція хаотичного руху та зіткнень кульок у дошці Гальтона дозволяє здійснити якісний перехід від формального, механічного заучування розв'язання задачі до глибокого, інтуїтивного розуміння фізичної та статистичної суті явища [7, 14, 29]. Завдяки фізичному рушію Blender, віртуальний експеримент стає максимально наближеним до реального, але при цьому залишається безпечним, доступним і повторюваним [7, 18, 25].

Важливо підкреслити, що застосування таких моделей у навчанні не повинно обмежуватися лише пасивною демонстрацією вчителем [15, 20]. У рамках реалізації STEM-підходу (Science, Technology, Engineering, Mathematics)

школярі трансформуються з пасивних споживачів контенту в активних творців, беручи безпосередню участь у повному циклі розробки: від математичного розрахунку та побудови базової геометрії до налаштування фізичних властивостей та написання анімаційних сценаріїв [1, 19, 36, 37]. Така діяльність комплексно розвиває ключові компетентності XXI століття: технічну та цифрову грамотність, інженерне та алгоритмічне мислення, просторову уяву та креативність [12, 13, 16, 22, 31]. Процес створення моделі змушує учня аналізувати структуру об'єкта, розбивати складну задачу на підзадачі та шукати шляхи їх вирішення, що формує навички проєктної діяльності та здатність модифікувати існуючі системи [4, 23, 34].

Таким чином, анімаційні моделі у навчальному процесі виступають потужним інтегративним інструментом формування міждисциплінарних компетентностей, що поєднують знання з фізики, математики та інформатики [1, 29, 36]. Вони сприяють значно глибшому розумінню навчального матеріалу через візуалізацію причинно-наслідкових зв'язків, забезпечують активне залучення учнів до дослідницької роботи та дозволяють реалізувати сучасні освітні підходи, орієнтовані на практику та розвиток творчого потенціалу особистості [4, 8, 19, 25, 40].

1.2. Роль анімацій у формуванні міжпредметних зв'язків

В умовах глобальної трансформації сучасної освітньої парадигми, яка поступово відходить від фрагментарного викладання окремих дисциплін до формування цілісної наукової картини світу, важливого значення набуває розвиток у здобувачів освіти здатності до трансферу знань та їх системного застосування в умовах динамічного, високотехнологічного середовища, що актуалізує впровадження інтегрованих підходів, зокрема STEM-освіти (Science, Technology, Engineering, Mathematics) [4, 11, 17].

У цьому складному педагогічному ландшафті анімаційні моделі, створені за допомогою професійного програмного інструментарію на кшталт Blender 3D, виступають не просто як допоміжний засіб візуалізації, а як потужний дидактичний хаб, що забезпечує органічну конвергенцію фундаментальних

наукових концепцій, інженерно-технічного проєктування, алгоритмічної логіки та художньо-естетичного бачення [18, 20, 27, 36].

Процес розробки та аналізу таких моделей докорінно змінює архітектуру навчальної діяльності, перетворюючи її на полідисциплінарний дослідницький акт: так, при проєктуванні віртуальної моделі динамометра учень змушений вийти за межі ізольованого розуміння фізики і синтезувати знання з різних галузей, адже для коректної симуляції роботи приладу необхідно не лише глибоко усвідомити природу сили пружності та закон Гука, а й виконати точні математичні розрахунки для калібрування вимірювальної шкали, застосувати інженерне мислення для створення кінематично правильної 3D-конструкції, а також залучити дизайнерські навички для налаштування реалістичних текстур, освітлення та композиції кадру, що надає моделі завершеного вигляду [7, 13, 19, 25, 29].

Особливої ваги набуває анімаційне моделювання при вивченні стохастичних процесів та абстрактних математичних понять, які традиційно викликають труднощі у сприйнятті, як-от статистичні розподіли: візуалізація роботи дошки Гальтона дозволяє трансформувати сухі формули теорії ймовірностей у наочний, динамічний експеримент, де учень спостерігає хаотичний рух тисяч частинок, що підпорядковуються законам фізики і в результаті неминуче формують чітку криву нормального розподілу, тим самим роблячи невидимі математичні закономірності емпірично доступними та зрозумілими [5, 14, 29].

Окрім очевидної предметної інтеграції, робота у тривимірному середовищі Blender стає потужним каталізатором розвитку когнітивних навичок високого рівня — системного аналізу, синтезу, алгоритмічного та критичного мислення, оскільки створення функціональної анімації вимагає від учня здатності прогнозувати поведінку системи, виявляти причинно-наслідкові зв'язки, діагностувати помилки у фізичних налаштуваннях та знаходити оптимальні шляхи їх вирішення [12, 22, 34].

Важливим аспектом є й соціально-комунікативна складова, адже реалізація комплексних анімаційних проєктів часто відбувається у форматі командної роботи, що симулює реальні умови ІТ-індустрії та наукових лабораторій, дозволяючи учасникам розподіляти ролі відповідно до індивідуальних схильностей — від «фізика-теоретика» до «3D-артиста» чи «програміста», що сприяє розвитку soft skills та розумінню того, що наука, техніка і мистецтво є не розрізненими сферами людської діяльності, а взаємопов'язаними елементами єдиної системи пізнання світу [23, 36, 37].

1.3. Переваги інтеграції Blender 3D у навчальний процес

Програмне середовище Blender 3D у контексті сучасної освітньої парадигми слід розглядати не просто як вузькоспеціалізований інструмент для комп'ютерної графіки, а як комплексну, поліфункціональну навчальну екосистему, що володіє унікальною архітектурою, здатною забезпечити реалізацію принципів конструктивізму та діяльнісного підходу в освіті [18, 20, 27]. На відміну від спрощених навчальних програм-симуляторів, Blender є професійним продуктом промислового стандарту з відкритим вихідним кодом (Open Source), що відкриває перед закладами освіти безпрецедентні можливості для технічного переозброєння без ліцензійних обмежень та фінансових витрат [20, 39].

Інтеграція цього програмного забезпечення у навчальний процес дозволяє вирішити фундаментальну дидактичну проблему — подолання розриву між абстрактно-символічною формою подання наукового знання (формули, графіки, текст) та його предметно-чуттєвим сприйняттям [5, 8, 29]. Завдяки можливостям фотореалістичного рендерингу (зокрема, з використанням рушіїв Cycles та Eevee), учні отримують змогу візуалізувати невидимі або важкодоступні для спостереження явища — від молекулярних структур до астрофізичних процесів — з високим ступенем наукової достовірності [7, 34]. Це трансформує роль учня зі спостерігача в активного дослідника, який не

просто запам'ятовує інформацію, а конструює власне розуміння через створення віртуальних моделей [15, 19, 23].

Окремим і надзвичайно потужним вектором педагогічного впливу Blender є розвиток алгоритмічного та математичного мислення через інструментарій «Geometry Nodes» (Геометричні вузли) та інтеграцію з мовою програмування Python [18, 34, 39]. Використання нодової системи дозволяє учням створювати складні процедурні об'єкти, оперуючи не вручну, а через побудову логічних ланцюжків та математичних функцій [1, 20, 36]. Наприклад, створення параметричної моделі, де форма змінюється залежно від введених числових значень, стає наочною демонстрацією функціональних залежностей, що є критично важливим для розуміння алгебри та геометрії [4, 29]. У цьому контексті математика перестає бути абстрактною наукою, стаючи прикладним інструментом дизайну та інженерії [13, 16, 31, 37]. Більше того, відкритий Python API дає можливість учням старших класів писати власні скрипти для автоматизації процесів або створення наукових візуалізацій, що забезпечує глибоку міжпредметну інтеграцію інформатики з природничими дисциплінами та формує навички Computational Thinking (обчислювального мислення) [22, 32, 34].

Важливим аспектом є також потенціал фізичного рушія Blender для створення віртуальних лабораторних практикумів [18, 20, 40]. Можливості симуляції фізики твердих тіл (Rigid Body), м'яких тіл (Soft Body), тканин, рідин та газів дозволяють проводити експерименти, які в реальних умовах можуть бути неможливими через брак обладнання, небезпеку або складність відтворення [7, 25, 34]. Учень може самостійно налаштовувати параметри середовища — змінювати гравітацію, коефіцієнти тертя, пружність матеріалів або опір повітря — і миттєво спостерігати наслідки цих змін [5, 29]. Це формує дослідницьку компетентність, вміння висувати гіпотези та перевіряти їх експериментальним шляхом [15, 19, 36]. Наприклад, моделюючи дошку Гальтона, учень може змінити масу кульок або відстань між перешкодами, щоб дослідити, як ці фактори впливають на фінальний статистичний розподіл,

отримуючи таким чином емпіричний досвід підтвердження ймовірнісних законів [14, 29].

1.4 Психолого-педагогічні особливості сприйняття тривимірної візуалізації та інтерактивного моделювання учнями

Впроваджуючи нові технології в школу, ми повинні розуміти не тільки комп'ютерні програми, а й те, як працює мислення сучасного учня [13, 25]. Чому 3D-модель працює краще, ніж малюнок у підручнику? Відповідь лежить у площині психології, адже підлітковий вік має свої особливості сприйняття інформації, які ідеально компенсуються можливостями 3D-графіки [8, 13, 35, 40].

У середніх та старших класах відбувається складна перебудова мислення: підлітки вчаться думати абстрактно, тобто уявляти речі, яких немає перед очима. Але цей процес не відбувається миттєво [19, 27]. На уроках фізики чи математики від учнів вимагають уявляти невидимі речі: сили, атоми, вектори, перерізи фігур [17]. Коли учень дивиться на плаский малюнок у книжці, його мозку доводиться виконувати подвійну роботу: спершу «домалювати» в уяві третій вимір (об'єм), і тільки потім зрозуміти фізичний закон. Для багатьох дітей це занадто складно [12]. 3D-модель у Blender виступає як «милиці» для уяви. Вона бере на себе роботу з візуалізації [36, 40]. Учень одразу бачить об'ємний об'єкт, може покрутити його і зазирнути всередину. Завдяки цьому його мозок звільняється від необхідності уявляти форму і може зосередитися на головному — на розумінні суті явища. Тобто комп'ютер допомагає дитині «побачити» абстрактну теорію [36].

Щоб стати хорошим інженером, архітектором чи фізиком, потрібно мати розвинену просторову уяву — вміння подумки крутити предмети. Психологи стверджують, що це вміння можна тренувати, як м'язи [27, 33]. Програма Blender — це ідеальний тренажер [36, 40]. Коли учень моделює, він змушений постійно перемикатися між різними видами: дивитися на об'єкт згори, збоку, спереду. Він вчиться розуміти, як пласкі креслення перетворюються на об'ємні

фігури [2]. Створюючи модель динамометра, дитина повинна зрозуміти, як деталі кріпляться одна до одної в просторі [17]. Така практика формує в мозку нові зв'язки, які потім допомагають легше розв'язувати задачі з геометрії та фізики [10].

Існує просте правило: ми краще запам'ятовуємо те, що бачимо в русі. Проблема підручників у тому, що вони намагаються пояснити рух (динаміку) нерухомими картинками (статикою) [19, 40]. Наприклад, малюнок стиснутої пружини не передає самого процесу стискання. Анімаційна модель вирішує цю проблему. Вона показує процес у часі [12]. Учень бачить, як саме змінюється довжина пружини, коли до неї чіпляють вантаж. Ба більше, сучасні діти звикли до інтерактивності. Їм нудно просто дивитися відео, а Blender дає можливість керувати процесом: запустити симуляцію, поставити на паузу, пришвидшити або сповільнити час [36]. Коли дитина сама керує віртуальним світом, вона відчуває себе дослідником, а не пасивним глядачем [15, 38,].

Вчені довели, що наше мислення тісно пов'язане з рухами рук (моторикою). Коли ми щось робимо руками, ми краще це розуміємо. Це особливо важливо для дітей-кінестетиків, яким треба «помацати», щоб зрозуміти [13]. Звісно, у віртуальному середовищі не можна торкнутися предметів по-справжньому. Але керування мишкою створює дуже схожий ефект. Коли учень тягне курсором пружину на екрані, його рука виконує дію, і мозок сприймає це як фізичний досвід [17, 36, 40]. Створюється зв'язок: «я потягнув — пружина розтягнулася». Це дає набагато глибше розуміння фізичних сил, ніж просте заучування формул [8].

Є важливий нюанс: мозок людини має обмежений ресурс уваги. Це називається «когнітивним навантаженням». Якщо навчальний інструмент занадто складний, учень витратить всі сили на те, щоб розібратися з кнопками, і на фізику сил вже не залишиться [27]. Blender — це професійна програма з тисячею кнопок. Якщо просто посадити учня перед порожнім екраном, він злякається і заплутається. Це буде «погане» навантаження [36, 40]. Саме тому методика вимагає правильного підходу: вчитель має давати готові шаблони і

чіткі інструкції. Ми прибираємо все зайве, залишаючи тільки потрібні для уроку функції. Тоді учень не відволікається на інтерфейс, а думає про завдання [15].

Сучасні підлітки вирости на відеоіграх та YouTube. Вони звикли до якісної, яскравої картинки і швидкої зміни кадрів. Чорно-білі схеми часто викликають у них нудьгу і втрату уваги [8, 13, 35]. Використання 3D-графіки говорить з учнями їхньою мовою — мовою ігор та кіно. Красива, реалістична модель викликає емоційний відгук: «Вау, це круто!». Коли дитині подобається те, що вона бачить, їй хочеться вчитися [18, 36, 40]. Крім того, працює «ефект творця». Коли учень сам створив (або налаштував) модель і вона запрацювала як треба, він відчуває гордість. Фізичний закон перестає бути нудним параграфом, а стає частиною його власного успішного проєкту [19, 23, 37].

Висновок до розділу 1

Здійснений у першому розділі теоретичний аналіз науково-методичної літератури дозволяє стверджувати, що модернізація засобів наочності є критичною умовою адаптації сучасної освіти до вимог інформаційного суспільства. Традиційні методи статичної візуалізації, які домінували в педагогічній практиці протягом тривалого часу, поступово втрачають свою ефективність в умовах стрімкого ускладнення навчального матеріалу та зміни когнітивних патернів сучасних учнів. Дослідження показало, що анімаційні 3D-моделі виступають не просто ілюстративним доповненням до теорії, а потужним когнітивним інструментом, здатним візуалізувати динаміку невидимих фізичних процесів та абстрактних математичних закономірностей, роблячи їх доступними для розуміння. У цьому контексті програмне середовище Blender 3D було визначено як оптимальна технологічна платформа для реалізації STEM-підходу, оскільки його відкрита архітектура та професійний функціонал дозволяють учням переходити з позиції пасивних споживачів цифрового контенту в позицію активних творців і дослідників.

Особливого значення у цьому процесі набувають психолого-педагогічні аспекти сприйняття тривимірної графіки. Встановлено, що використання інтерактивного 3D-моделювання відповідає віковим особливостям учнів підліткового віку, слугуючи своєрідною «когнітивною опорою» при переході від конкретно-образного до абстрактно-логічного мислення. Візуалізація об'ємних структур знижує зовнішнє когнітивне навантаження, звільняючи ресурси робочої пам'яті учня для глибокого аналізу сутності явищ, а необхідність маніпулювання об'єктами у віртуальному просторі сприяє інтенсивному розвитку просторового інтелекту та ментальної ротації. Крім того, доведено, що такий підхід активізує сенсомоторний канал сприйняття та підвищує внутрішню мотивацію здобувачів освіти завдяки ефекту гейміфікації та естетичній привабливості сучасних графічних технологій.

Комплексний аналіз також підтвердив, що інтеграція інструментарію Blender у навчальний процес створює унікальні умови для реалізації міжпредметних зв'язків. Процес створення та налаштування фізичної симуляції вимагає від учня одночасного застосування знань з фізики, математики, інженерії та інформатики, що забезпечує формування цілісної наукової картини світу та розвиток ключових компетентностей. Таким чином, теоретичне обґрунтування дидактичного, психологічного та методичного потенціалу 3D-технологій дозволяє констатувати, що обраний напрям дослідження є актуальним та перспективним, що створює необхідне підґрунтя для розробки практичної методики та її експериментальної перевірки у наступних розділах роботи.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА АНІМАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ФІЗИЧНИХ ЯВИЩ

2.1. Методичні засади та програмно-технічне забезпечення розробки інтерактивних навчальних моделей

Процес створення цифрових засобів навчання для STEM-освіти суттєво відрізняється від класичного 3D-моделювання, що застосовується в індустрії розваг чи дизайні [18, 27, 40]. Якщо у комп'ютерних іграх чи кінематографії пріоритетом є візуальна ефектність та художня виразність, то в освітньому контексті на перший план виходять наукова достовірність, дидактична доцільність та технічна доступність [5, 7, 25]. Ефективна навчальна модель — це результат синергії педагогічних вимог та правильного вибору програмного інструментарію [1, 4, 36].

Першочерговим завданням при проєктуванні навчального контенту є забезпечення принципу наукової достовірності. Віртуальне середовище не повинно викривляти фізичну реальність [7, 25]. Це означає відмову від «ручної» анімації (Keyframe Animation), де рух об'єкта задається автором довільно, на користь процедурної фізичної симуляції [18, 34, 40]. Наприклад, деформація пружини динамометра не може бути простою зміною масштабу об'єкта: вона повинна математично точно відповідати закону Гука ($F = -kx$) [5, 29]. Тільки за умови, що віртуальна модель реагує на дії учня згідно з фізичними законами, вона може вважатися повноцінним лабораторним інструментом, а не простою ілюстрацією [7, 19, 36].

Другим критично важливим аспектом є принцип інтерактивності. Сучасна дидактика розмежовує поняття «демонстрація» та «симуляція» [8, 40].

Демонстрація передбачає пасивне споглядання відеоролика, тоді як симуляція вимагає активного втручання користувача [18, 35]. Розроблювані моделі повинні надавати учневі можливість змінювати вхідні параметри системи: жорсткість пружини, масу вантажу, гравітацію, коефіцієнт пружності матеріалів [5, 7, 25]. Саме можливість варіювати умови експерименту та миттєво спостерігати наслідки трансформує учня з пасивного спостерігача в активного дослідника, що є основою діяльнісного підходу в освіті [15, 19, 36].

Третьою вимогою є принцип когнітивної доступності та адаптивності інтерфейсу. Професійні редактори тривимірної графіки часто мають перевантажений інтерфейс, що створює надмірне зовнішнє когнітивне навантаження (*extraneous cognitive load*) [13, 27, 40]. Для учня середньої школи велика кількість інструментів моделювання, текстурування та скульптингу є зайвою і відволікає від суті фізичного процесу [18, 20, 39]. Тому методично виправданим є використання адаптованих шаблонів, де робочий простір (*Workspace*) спрощено: приховано зайві панелі, а увага сфокусована виключно на 3D-сцені та панелі керування фізичними параметрами [15, 27, 34].

Для реалізації визначених методичних принципів було проведено порівняльний аналіз існуючого програмного забезпечення для 3D-моделювання та симуляцій. Розглядалися такі популярні платформи, як SketchUp, Unity 3D, PhET Interactive Simulations та Blender 3D.

- SketchUp є інтуїтивно зрозумілим інструментом для архітектурного проєктування, проте його базовий функціонал не містить вбудованого фізичного рушія, необхідного для симуляції динамічних процесів (гравітації, пружності, зіткнень), що робить його непридатним для фізичних симуляцій без встановлення складних платних плагінів.
- Unity 3D / Unreal Engine — потужні ігрові рушії з досконалою фізикою. Однак вони вимагають значних навичок програмування (C#, C++), що зміщує акцент уроку фізики на вивчення коду. Крім того, процес компіляції проєкту ускладнює внесення швидких змін під час уроку.

- PhET Interactive Simulations пропонують якісні готові симуляції, але є закритою системою. Учень може використовувати їх лише як користувач, але не може модифікувати внутрішню структуру моделі, що обмежує розвиток інженерних та конструкторських навичок.

На основі аналізу було зроблено висновок, що оптимальним інструментом для STEM-освіти є Blender 3D. Цей вибір зумовлений комплексом унікальних технічних характеристик:

1. Відкритий вихідний код (Open Source): Програма є безкоштовною, що знімає питання ліцензування для навчальних закладів.
2. Вбудований фізичний рушій Bullet Physics: Blender дозволяє симулювати механіку твердих тіл (Rigid Body), м'яких тіл (Soft Body), тканин та рідин без додаткових плагінів. Це дозволяє створювати фізично коректні моделі динамометра та дошки Гальтона штатними засобами.
3. Система драйверів (Drivers) та Python API: Можливість пов'язувати властивості об'єктів математичними формулами дозволяє візуалізувати складні залежності (наприклад, зв'язати позицію стрілки приладу з деформацією пружини).
4. Рушій рендерингу Eevee: Технологія рендерингу в реальному часі дозволяє візуалізувати складні сцени навіть на шкільних комп'ютерах середньої потужності, забезпечуючи миттєвий візуальний зворотний зв'язок.

У процесі розробки моделей використовувалися специфічні технології Blender, що відповідають поставленим методичним вимогам. Для моделювання динамометра ключовою стала технологія параметричного моделювання з використанням модифікатора Screw (Гвинт) та системи Constraints (Обмеження) [18, 20, 34]. Замість створення статичної форми пружини, було використано математичний алгоритм генерації геометрії, який динамічно змінює крок витків залежно від прикладеної сили. Це дозволило візуалізувати закон Гука не як абстрактну формулу, а як спостережуваний механічний процес [5, 7, 25]. Для створення дошки Гальтона було використано систему симуляції масових частинок на базі Rigid Body Physics. Це дозволило відтворити стохастичну

природу руху кульок, де кожен відскік розраховується індивідуально на основі кута падіння, швидкості та коефіцієнта пружності [14, 29, 34]. Важливим технічним рішенням стало використання оптимізованих колізійних форм (Collision Shapes) типу «Mesh» для лійки та «Sphere» для кульок, що забезпечило високу точність симуляції при збереженні прийнятної швидкодії системи [34, 39].

Таким чином, поєднання методично обґрунтованих вимог до навчального контенту з потужним функціоналом Blender 3D дозволило створити інтерактивні моделі, які є не просто візуалізацією, а повноцінним інструментом наукового пізнання.

2.2. Створення моделі динамометра

Динамометр - це прилад для вимірювання сили. Найчастіше він використовується в шкільних лабораторіях під час вивчення механічних явищ, зокрема теми «Сила та її вимірювання». Конструктивно динамометр складається з пружини, яка розтягується під дією сили, і шкали, за якою визначається величина цієї сили в ньютонках. Чим більша сила діє на пружину, тим більше вона подовжується - саме на цьому ґрунтується принцип роботи приладу.

У шкільних лабораторних роботах динамометр дозволяє учням експериментально перевірити закон Гука, вивчити залежність сили пружності від деформації, вимірювати вагу тіл, досліджувати тертя або підйомні сили. Учні за допомогою динамометра можуть вимірювати силу натягу нитки, силу тяжіння або силу тертя, порівнювати результати з розрахунковими значеннями та робити висновки про точність вимірювань.

Застосування віртуальної 3D-моделі динамометра, створеної у Blender, дозволяє наочно продемонструвати всі етапи його роботи, зокрема зміну довжини пружини під дією сили, шкальне вимірювання, ситуації з перевантаженням або калібруванням. Така модель може бути використана як

інтерактивний візуальний матеріал або як частина цифрового лабораторного практикуму.

У подальшій роботі над 3D-моделлю динамометра планується застосування інструменту Screw Modifier для створення більш реалістичної пружини. Цей модифікатор дозволяє точно сформувати гвинтоподібну геометрію на основі обертання базового перерізу, що ідеально підходить для моделювання спіральних об'єктів, таких як пружини. Завдяки цьому модель динамометра зможе ще точніше відображати зовнішній вигляд і конструктивні особливості реального приладу.

Також передбачається використання системи Rigid Body Physics для симуляції руху вантажу, який створює силу, що деформує пружину. Застосування цього інструменту дозволить додати до моделі фізичну поведінку: масу, силу тяжіння, взаємодію з іншими тілами. У результаті динамометр зможе не лише виглядати достовірно, а й реагувати на зміну навантаження у вигляді анімованого видовження пружини. Це значно підвищить навчальну цінність моделі, зробивши її придатною для цифрових демонстрацій фізичних явищ у класі.

Процес моделювання розпочинається зі створення базової геометрії конструктивних елементів. З примітива «Cube» (Куб) формується верхня платформа (кріплення) та нижній вантаж (тягарець) (рис. 2.1).

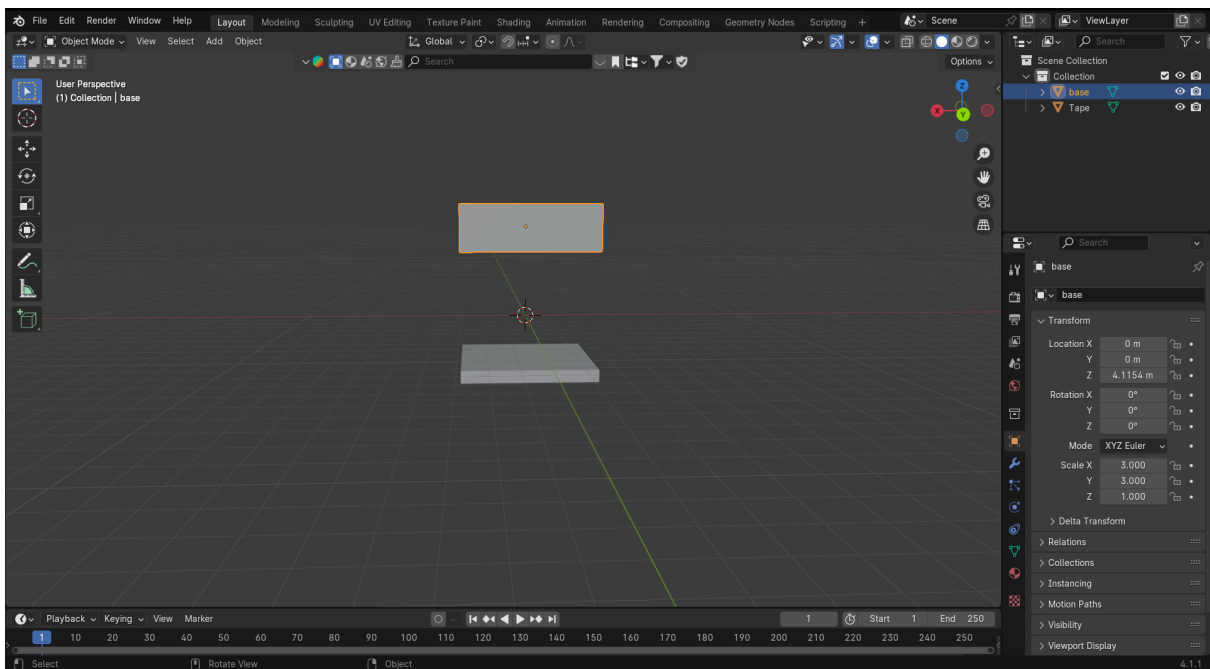


Рис. 2.1. Платформа та тягарець

Для створення тіла пружини використовується примітив «Circle» (Коло), який розміщується перпендикулярно до осі майбутньої пружини (рис. 2.2). Важливим етапом є застосування операції «Apply Scale» (Ctrl + A), що фіксує трансформації об'єкта для коректної роботи модифікаторів.

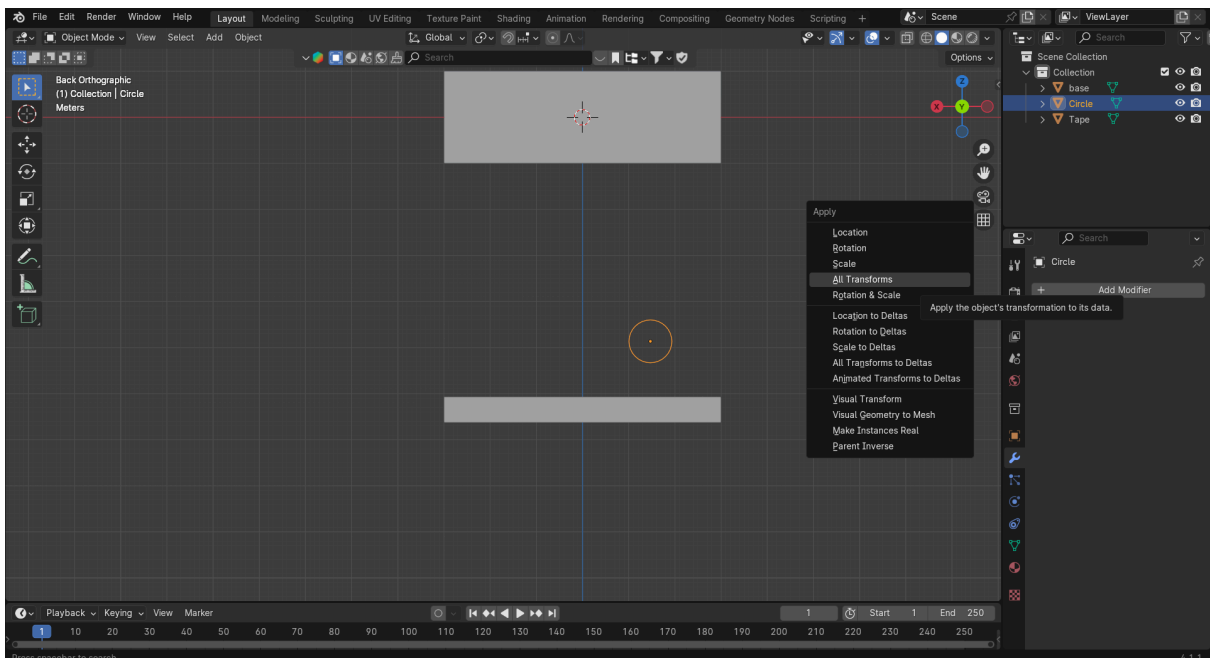


Рис. 2.2. Розміщуємо пружину

Формування спіральної геометрії здійснюється шляхом додавання до об'єкта «Circle» модифікатора Screw. Налаштування параметрів модифікатора

(крок гвинта, кількість ітерацій) визначає початкову довжину та щільність витків пружини (рис. 2.3).



Рис. 2.3. Використовуємо модифікатор *Screw*

Для точного позиціонування елементів кріплення необхідно перейти в режим редагування (Tab) та використати меню прив'язки курсора (Shift + S), розмістивши його в центрі геометричної осі пружини (рис. 2.4).

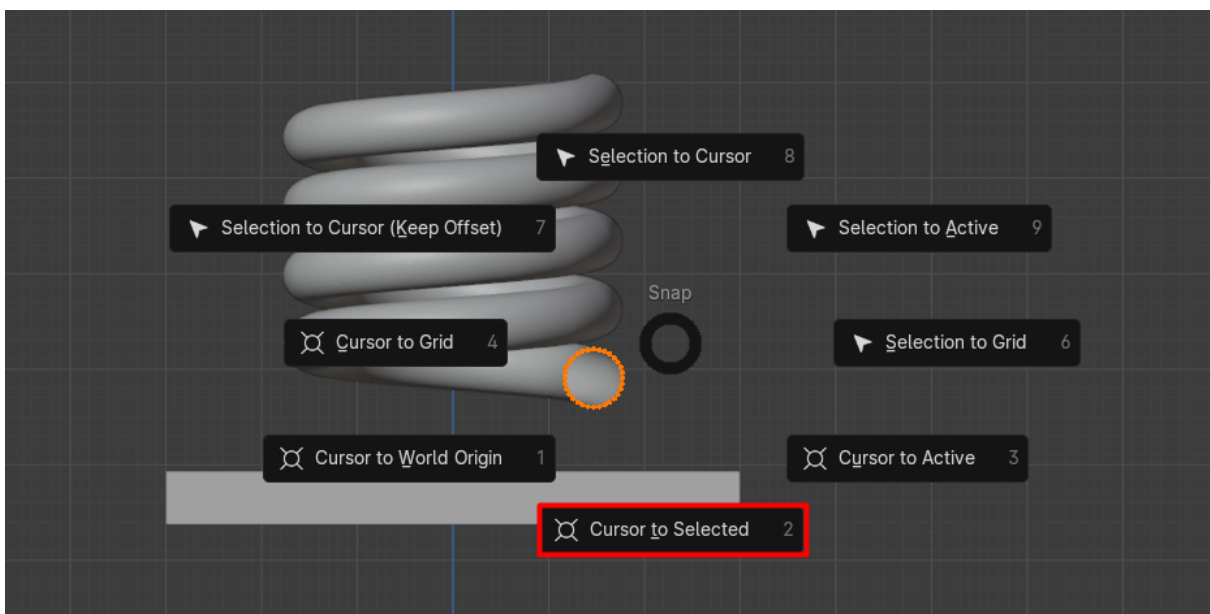


Рис. 2.4. Перенос курсора

Наступним кроком є створення сполучних елементів (гачків або петель). Геометрія копіюється та модифікується для з'єднання з верхньою платформою та нижнім тягарцем (рис. 2.5). За допомогою команди «Join» (Ctrl + J) верхнє

кріплення об'єднується з платформою, а нижнє — з вантажем, утворюючи цілісні об'єкти.

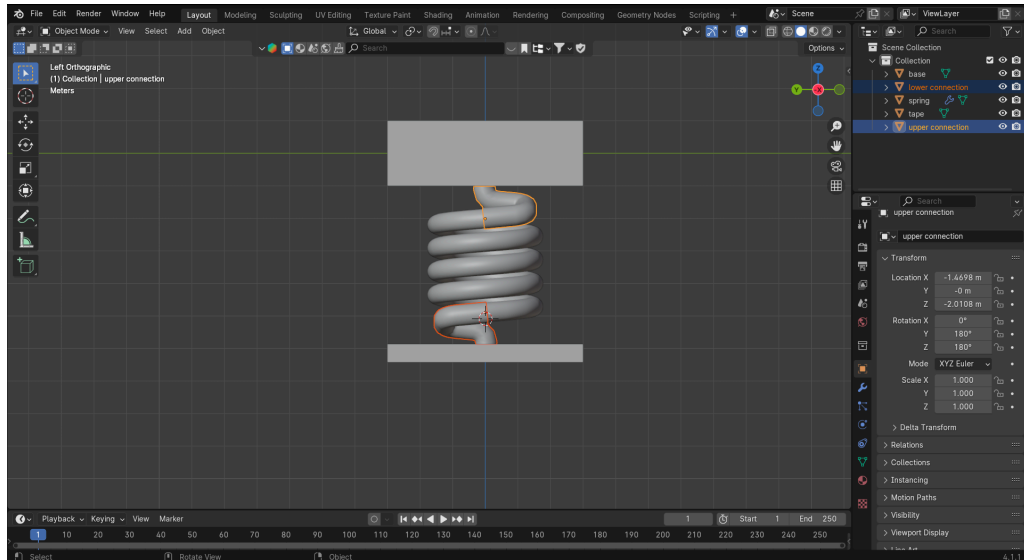


Рис. 2.5. З'єднуємо інші об'єкти з пружиною

Налаштування фізичних властивостей відбувається у вкладці «Physics Properties». Для верхньої платформи, яка має залишатися нерухомою, активується режим Rigid Body з типом Passive. Для тягарця, який повинен рухатися під дією гравітації, встановлюється тип Active (рис. 2.6).

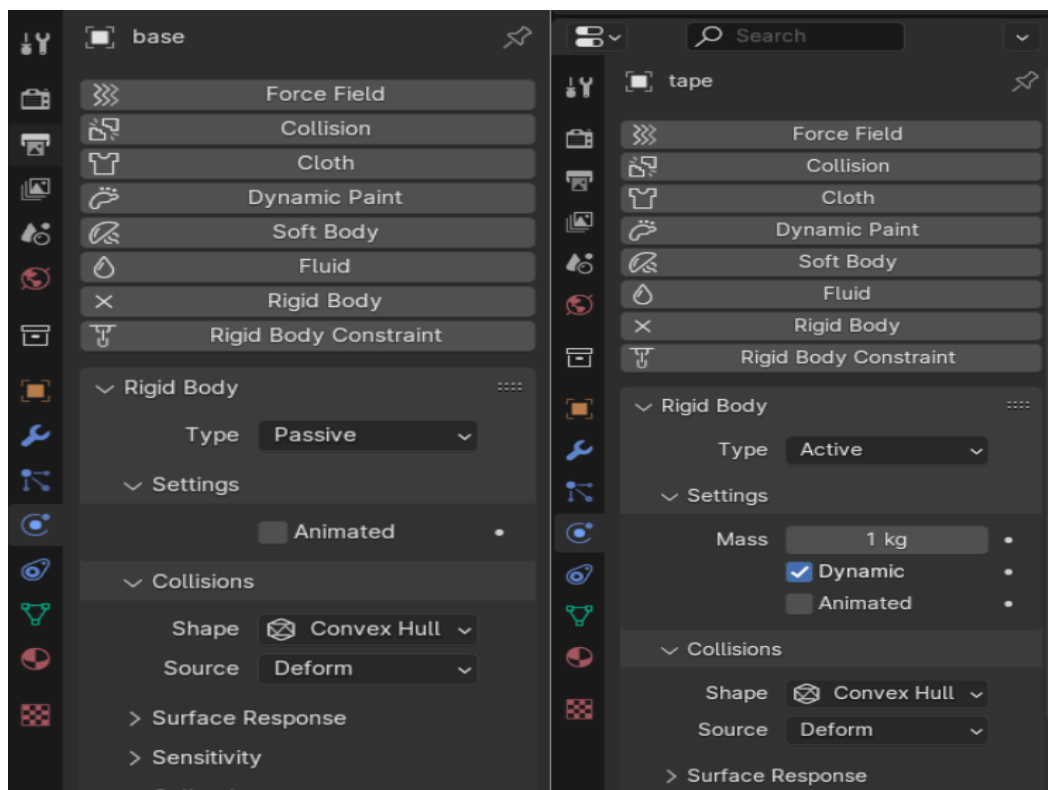


Рис. 2.6. Налаштування модифікатора Rigid Body

Створення фізичного зв'язку між елементами реалізується через інструмент Connect у меню «Rigid Body». Виділивши обидва об'єкти, створюємо зв'язок, який автоматично додає в сцену об'єкт-обмежувач (Constraint) (рис. 2.7).

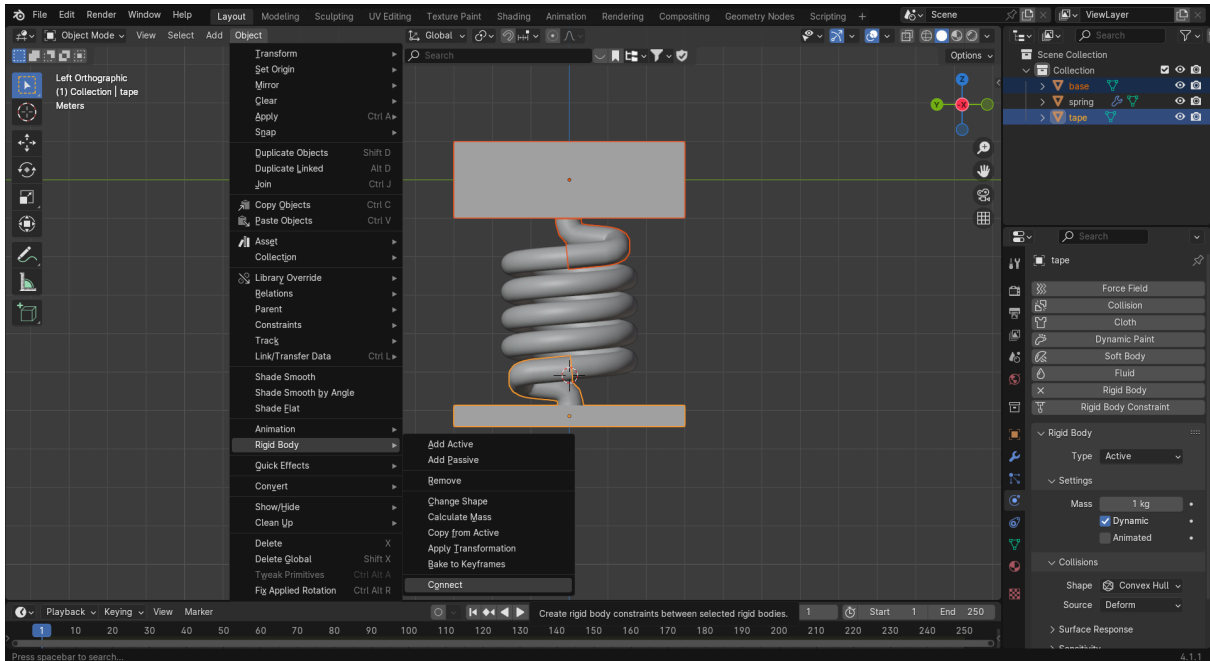


Рис. 2.7. Об'єднуємо тягарець і платформу і дотичні елементи в два об'єкти

У налаштуваннях створеного обмежувача (Constraint) необхідно змінити тип зв'язку на Generic Spring. Це дозволяє симулювати пружність. Активація пружини по осі Z (Linear Z Axis) забезпечує рух вантажу лише у вертикальній площині (рис. 2.8).

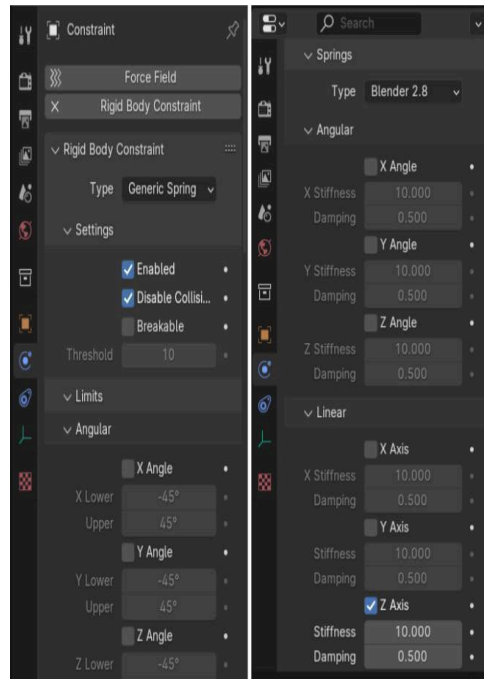


Рис. 2.8. Настроюємо пружину

Для візуальної синхронізації розтягування пружини з рухом вантажу використовується механізм драйверів. У полі налаштування модифікатора Screw додається драйвер (Add Driver), який зчитує Z-координату тягарця і перетворює її на параметр висоти гвинта. Математичний вираз $\text{var}/(\text{число скільки в вашій пружині Iterations}) + (\text{число скільки в вашій пружині Screw})$ забезпечує пропорційну зміну геометрії (рис. 2.9). Якщо пружина рухається не в ту сторону, що потрібно тоді перед var потрібно поставити “-”.

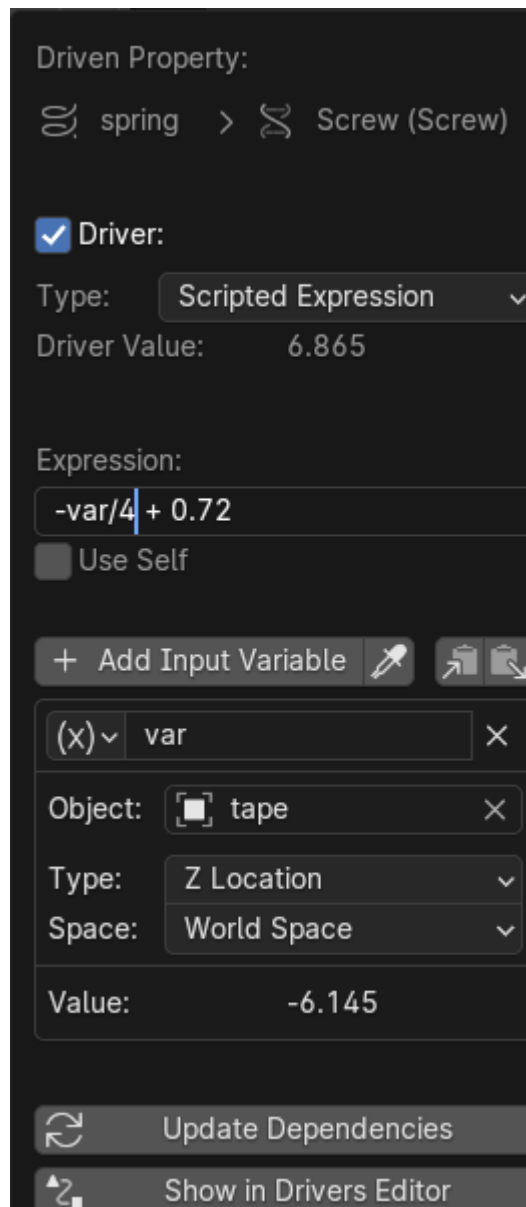


Рис. 2.9. Настроємо модифікатор Screw

У випадку розбіжності центрів мас або зміщення об'єктів після додавання фізики, необхідно оновити їх локацію (Ctrl + A) для коректного розрахунку початкового стану системи (рис. 2.10).

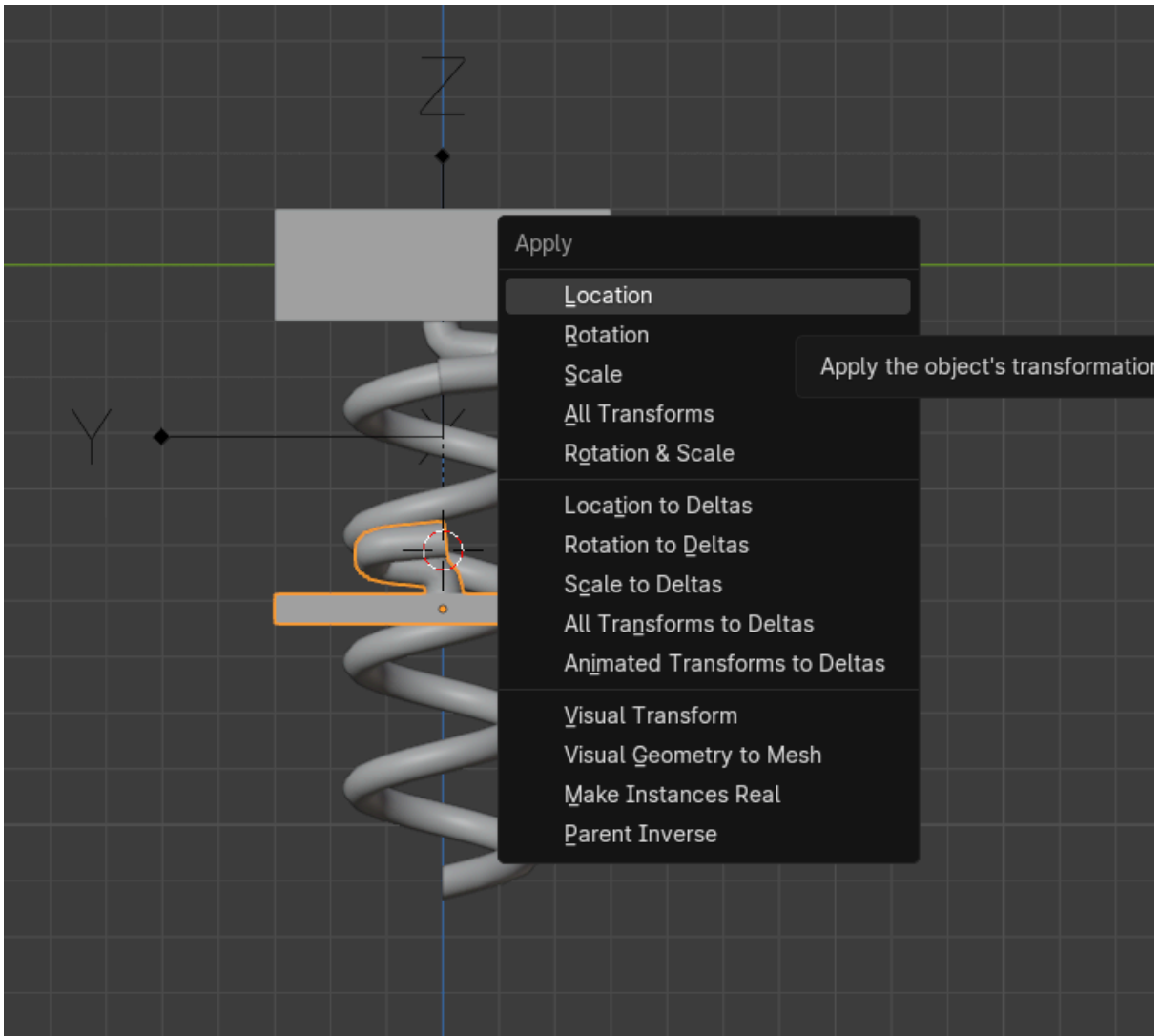


Рис. 2.10. Приймаємо локацію тягарця

Завершальний етап включає додавання текстури вимірювальної шкали та калібрування приладу. Змінюючи параметр **Stiffness** (Жорсткість) у налаштуваннях пружини та масу вантажу, досягаємо відповідності показників розрахунковим даним (наприклад, вантаж масою 2 кг має вказувати на позначку, що відповідає силі тяжіння $\approx 19,6$ Н). Результат перевірки представлено на рис. 2.11.

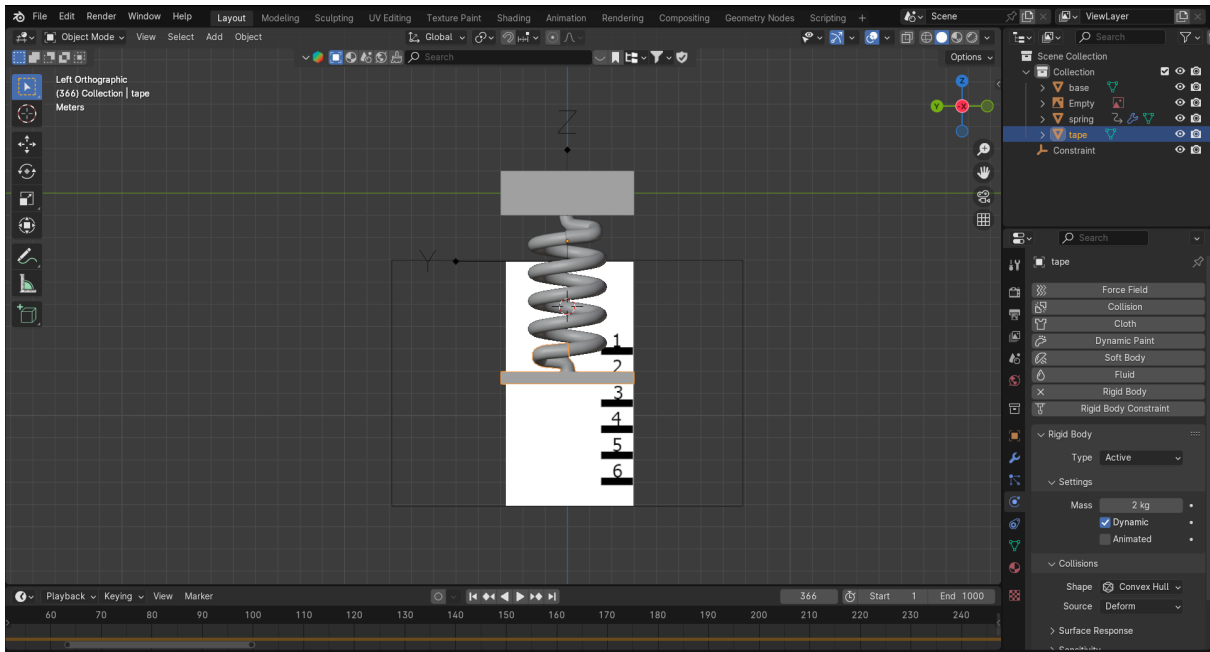


Рис. 2.11 Перевірка результату

2.3. Створення моделі дошки Гальтона

Дошка Гальтона (або галітова дошка) - це навчальний пристрій, призначений для візуалізації випадкових процесів і демонстрації формування нормального (гаусового) розподілу. Вона названа на честь англійського вченого Френсиса Гальтона, який у XIX столітті запропонував її як наочний інструмент для пояснення статистичних закономірностей.

Конструктивно дошка Гальтона - це вертикальна поверхня з рядами виступів (цвяшків або штифтів), розташованих у шаховому порядку. Вгорі запускаються кульки, які, падаючи вниз, хаотично відбиваються від перешкод, змінюючи напрям руху - ліворуч або праворуч. Після кількох рядів таких зіткнень кульки потрапляють у нижні комірки, що слугують лотками для підрахунку частоти "випадання" кожного можливого результату.

У підсумку утворюється характерна дзвоноподібна форма - крива Гауса, або нормальний розподіл, який показує, що найбільше кульок накопичується в центральних лотках, а що далі від центру - то менше. Це дає змогу учням зрозуміти важливі поняття з теорії ймовірностей і статистики: середнє значення, дисперсію, симетрію розподілу.

3D-модель дошки Гальтона, створена в Blender 3D, дозволяє вчителям візуалізувати ці процеси динамічно: кульки в реальному часі падають, відскакують від штифтів, накопичуються внизу, а учень бачить, як формується розподіл. Таке зображення набагато ефективніше за плоскі діаграми, адже дозволяє спостерігати за процесом формування результату, а не лише за його підсумком.

Використання такої моделі на уроках не лише робить навчання більш цікавим, а й сприяє глибшому розумінню статистичних закономірностей, що дуже важливо для розвитку аналітичного та критичного мислення в учнів старших класів.

Для створення моделі дошки Гальтона потрібно створити куб і збільшити його (рис. 2.12). Саме в ньому буде відбуватись дослід. Після чого у вкладці фізики додаємо Rigid Body і вибираємо тип Passive.

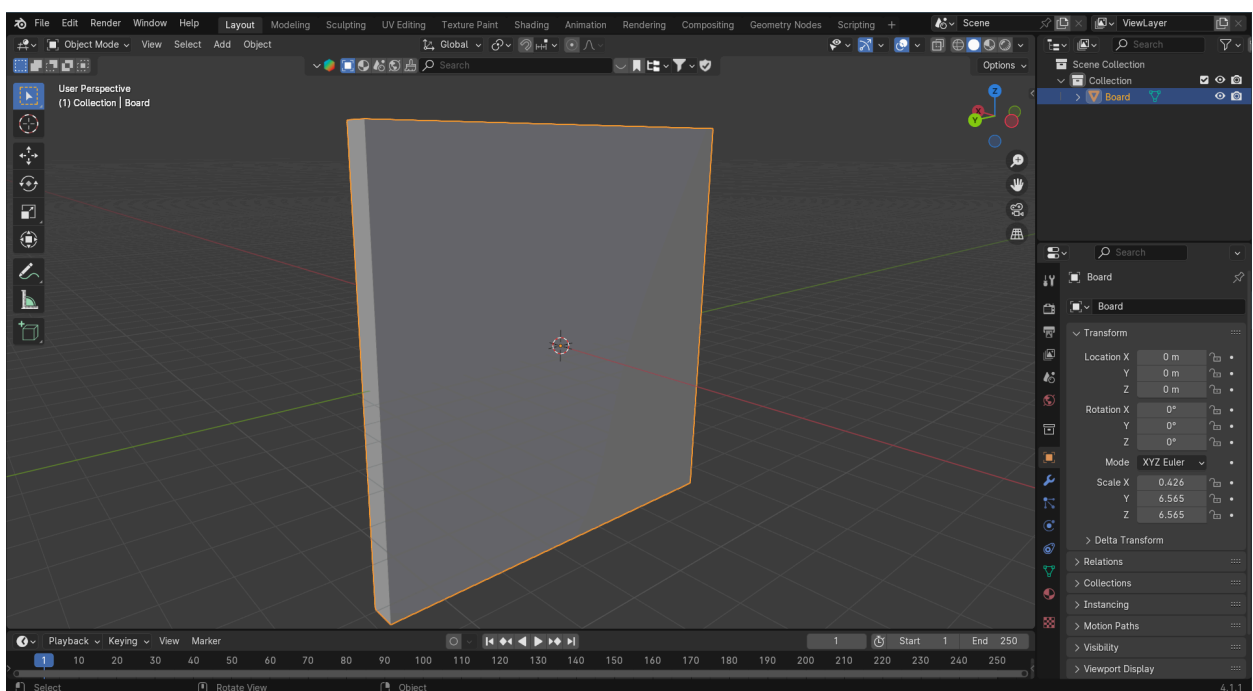


Рис. 2.12. Створюємо і розширюємо куб

Для зручності моделювання внутрішніх елементів активується режим прозорості Toggle X-Ray (рис. 2.13), що дозволяє бачити крізь стінки об'єкта.

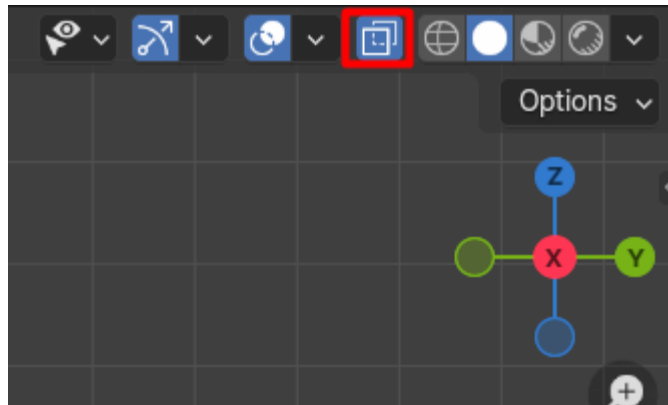


Рис. 2.13. Включаємо режим Toggle X-Ray

Всередині корпусу формуються похилі платформи (лійка), які спрямовують потік кульок до центру перед падінням. Ці елементи також є статичними перешкодами, тому їм присвоюється фізичний тип Passive (рис. 2.14).

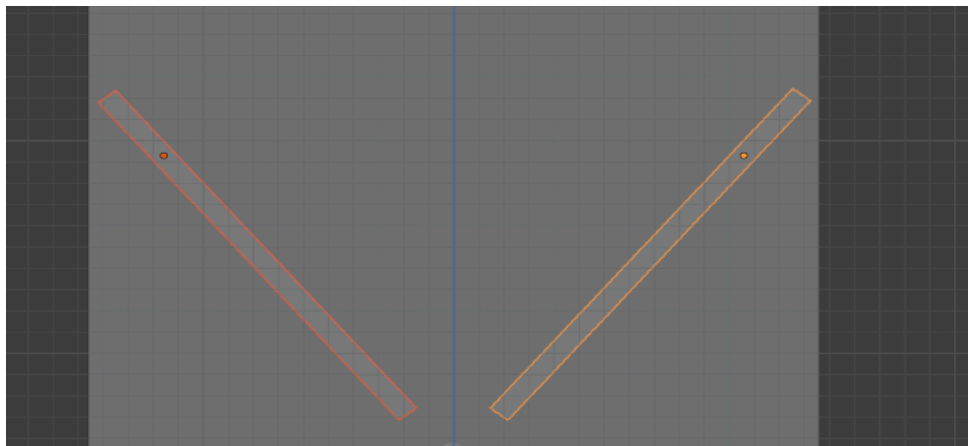


Рис. 2.14 Створюємо платформи

У нижній частині конструкції створюються вертикальні перегородки, що утворюють комірки (лоти) для накопичення кульок. Ширина комірок має бути достатньою для вільного розміщення кількох кульок (рис. 2.15).

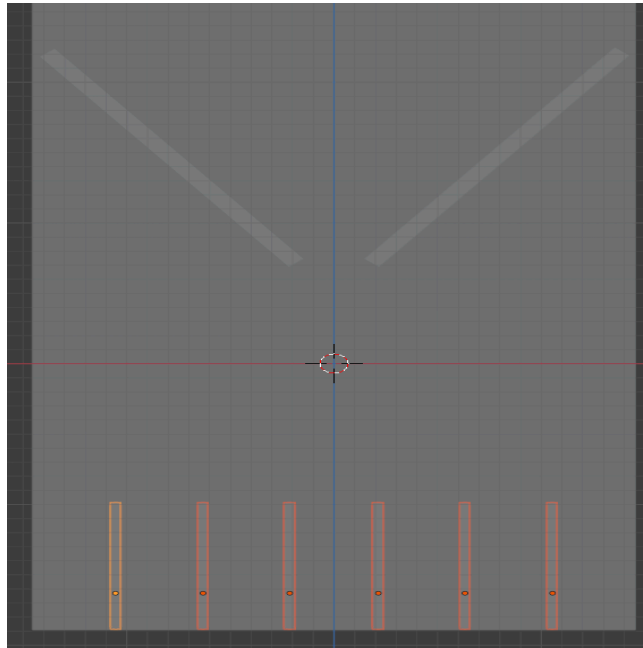


Рис. 2.15. Створюємо перемички

Ключовим елементом конструкції є система штифтів, розташованих у шаховому порядку (quincunx). Така геометрія забезпечує рівну ймовірність відскоку кульки вліво або вправо при кожному зіткненні. Штифти також є пасивними фізичними тілами (рис. 2.16)

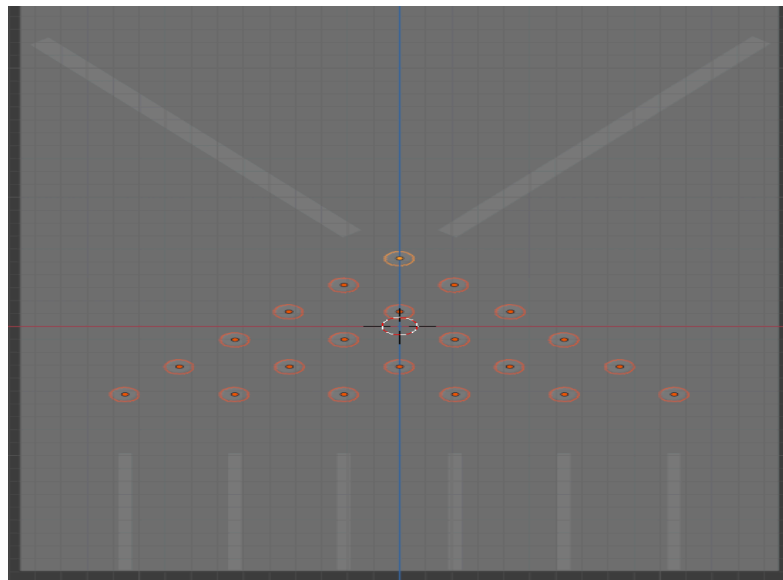


Рис. 2.16. Створюємо штири

Генерація потоку частинок реалізується шляхом створення групи кульок у верхній частині приладу. Для цих об'єктів встановлюється фізичний тип Active, що дозволяє їм падати під дією гравітації та взаємодіяти з перешкодами (рис. 2.17).

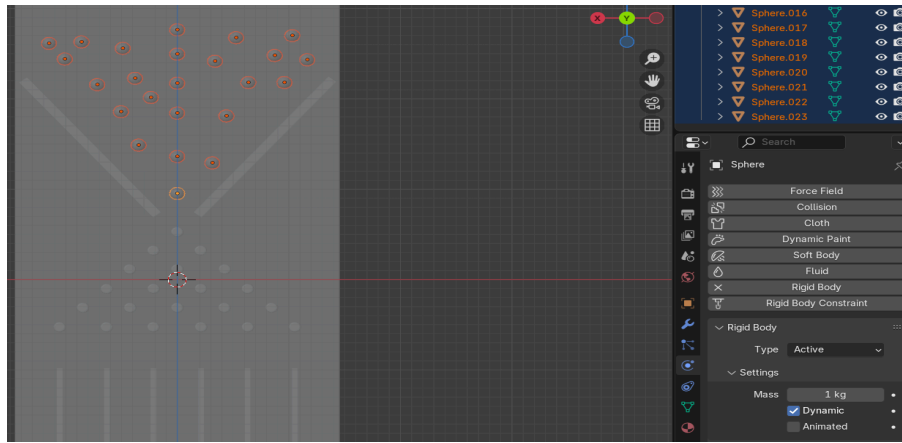


Рис. 2.17. Створюємо кульки

Важливою особливістю фізичного рушія Blender є кешування симуляції. Щоб отримати унікальні результати розподілу при повторних запусках або змінити динаміку процесу, можна варіювати параметр Speed (Швидкість) у налаштуваннях сцени (Rigid Body World). Це змінює крок інтеграції симуляції, що призводить до мікроскопічних змін у траєкторіях, формуючи нову статистичну картину (рис. 2.18).

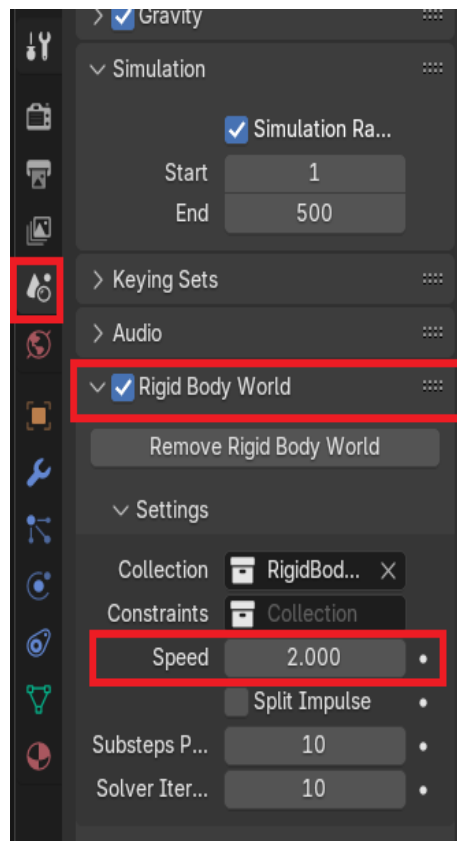


Рис. 2.18. Перевірка результату/зміна швидкості анімації

2.4. Розширення типології віртуальних моделей

Також в рамках дослідження було створено моделі для зображення фізичних процесів, демонстрація яких у реальних умовах пов'язана з технічними труднощами, громіздкістю обладнання або ризиком травмування учнів. Розширення типології розроблених засобів дозволило підтвердити гіпотезу про універсальність середовища Blender 3D для моделювання явищ різної фізичної природи — від кінематики до динаміки обертального руху.

Для моделювання закону збереження енергії та закону збереження моменту імпульсу була створена дзига та платформа під нею (рис. 2.19). За допомогою такої моделі можна змінювати початкову швидкість і масу, що буде впливати на час, який дзига буде обертатись.

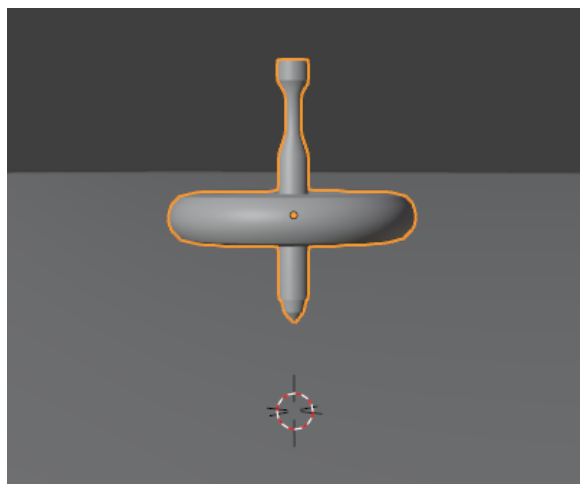


Рис. 2.19. Модель для дослідження обертального руху тіла

Візуалізація складних концепцій є особливо важливою для розуміння абстрактних понять. За допомогою Blender можна створити наочні моделі явищ, які важко уявити лише за допомогою формул і текстів. Це дає змогу учням формувати більш цілісне уявлення про фізичну реальність і сприяє розвитку їхнього просторового мислення.

Наприклад, створивши два однакових вантажі на цівку, ми можемо спостерігати дослід з інерцією, на результат якої можна вплинути змінивши такі параметри: масу одного або двох вантажів, пружність, кут початку руху вантажа (див. рис. 2.20). При зіткненні вантажів з рівними масами вони зупиняється, але

при збільшенні їхньої пружності відбудеться відхилення на однакову відстань від місця зіткнення.

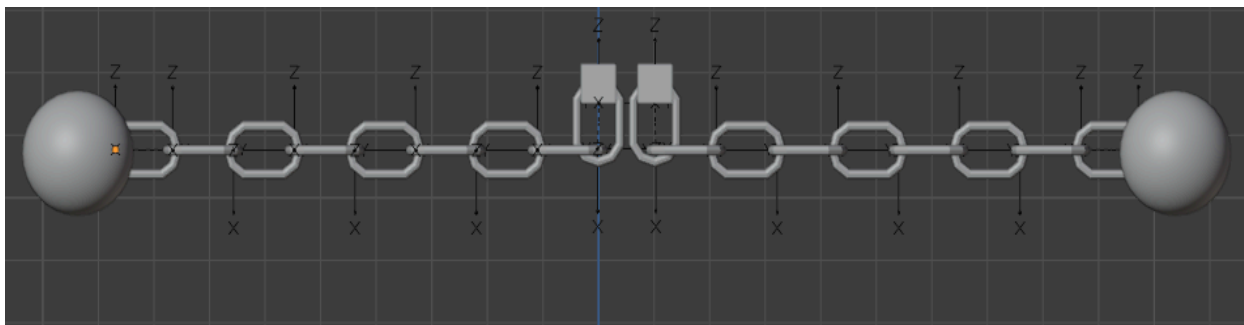


Рис. 2.20. Модель для дослідження інерції тіл

Навички роботи з 3D-моделями та анімацією стають все більш затребуваними на сучасному ринку праці. Випускники, які мають досвід роботи з Blender, мають значну перевагу при вступі до вузів та при працевлаштуванні. Крім того, Blender є відкритим програмним забезпеченням, що робить його використання доступним для всіх бажаючих.

Висновки до розділу 2

У другому розділі здійснено комплексне обґрунтування та практичну реалізацію технології створення інтерактивних засобів навчання у середовищі Blender 3D. На основі аналізу дидактичних потреб STEM-освіти було сформульовано систему методичних вимог до віртуальних моделей, ключовими з яких визначено наукову достовірність, фізичну коректність симуляції, інтерактивність та адаптивність інтерфейсу до когнітивних можливостей учнів. Обґрунтовано вибір програмного середовища Blender як оптимальної платформи, що поєднує відкриту архітектуру (Open Source), потужний фізичний рушій Bullet Physics та можливості параметричного керування об'єктами через систему драйверів.

Практична складова дослідження реалізована через розробку двох базових моделей, що охоплюють різні змістові лінії природничо-математичного циклу. При проєктуванні віртуального динамометра було успішно вирішено задачу візуалізації функціональної залежності (закону Гука). Використання модифікатора *Screw* у поєднанні з математичними драйверами дозволило

створити автоматизовану систему, де геометрична деформація пружини відбувається пропорційно до маси навантаження, перетворюючи модель на повноцінний вимірювальний прилад.

Розробка моделі дошки Гальтона продемонструвала ефективність використання симуляцій твердих тіл (*Rigid Body*) для ілюстрації стохастичних процесів. Візуалізація руху масових частинок у реальному часі дозволила наочно відтворити формування нормального розподілу Гауса, забезпечуючи перехід від спостереження хаотичних зіткнень до розуміння статистичних закономірностей.

Таким чином, розроблені у другому розділі 3D-моделі виступають не просто ілюстративним матеріалом, а гнучким інструментом для організації дослідницької діяльності учнів в умовах «ідеального» віртуального експерименту. Створений цифровий контент, разом із визначеними методичними принципами його проєктування, становить матеріально-технічну основу для проведення педагогічного експерименту та перевірки ефективності запропонованої методики у реальному навчальному процесі.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА МЕТОДИКИ

3.1. Мета, завдання та гіпотеза експерименту

Експериментальна перевірка ефективності впровадження авторської методики виступає фундаментальним, інтегральним та обов'язковим етапом наукового дослідження, оскільки саме цей процес забезпечує комплексну верифікацію розроблених теоретичних концепцій та підтверджує практичну доцільність і валідність запропонованих інструментів у реальних умовах освітнього процесу. У сучасних реаліях стрімкого розвитку STEM-освіти, де результативність навчання критично залежить не лише від змістового наповнення, а й від якості методичного супроводу, інноваційної складової та доступності високотехнологічних ресурсів, ґрунтова апробація спеціалізованих платформ набуває стратегічного значення. Вона дозволяє об'єктивно оцінити безпосередній вплив цифрових інструментів на динаміку когнітивного розвитку учнів, формування їхніх професійних компетентностей та мотиваційну сферу. Педагогічний експеримент у цьому контексті слугує інструментом переходу від теоретичного моделювання до емпіричного доведення переваг використання тривимірної графіки.

Метою дослідження є теоретичне обґрунтування, практична реалізація та експериментальна перевірка педагогічної ефективності методики використання інтерактивних 3D-моделей, створених у середовищі Blender, як засобу імплементації STEM-технологій у процес вивчення природничо-математичних дисциплін. Досягнення мети передбачає фіксацію якісних змін у рівні засвоєння учнями навчального матеріалу, розвиток їхніх дослідницьких навичок, інженерного мислення та формування стійкої внутрішньої мотивації до вивчення точних наук через залучення сучасних інструментів цифрової візуалізації та моделювання.

Експериментальна перевірка ґрунтується на такій гіпотезі: основі експерименту лежить припущення про те, що систематичне використання інтерактивної анімаційної моделі динамометра у навчальному процесі значно підвищить ефективність опанування теми, оскільки віртуальне середовище

дозволяє учням експериментувати з параметрами, які неможливо миттєво змінити в реальності, наприклад, варіювати жорсткість пружини або проводити досліди за відсутності гравітації, що сприятиме трансформації абстрактних знань у стійкі практичні навички та забезпечить розвиток технічної грамотності, просторової уяви та інтересу до STEM-професій, що в підсумку виявиться значно продуктивнішим за використання виключно класичних засобів навчання.

Завдання експериментального дослідження:

1. Діагностично-констатувальне завдання:

Провести вхідне діагностування для визначення початкового рівня навчальних досягнень, мотивації та сформованості цифрових навичок учнів контрольної та експериментальної груп, а також оцінити готовність педагогів до використання 3D-технологій.

2. Формувально-методичне завдання:

Впровадити розроблену методику в освітній процес експериментальної групи, забезпечивши використання інтерактивних моделей під час лабораторних та практичних занять.

3. Аналітико-оцінювальне завдання:

Здійснити оцінку зручності та функціональності розробленого ресурсу, проаналізувати рівень залученості учнів та їхню емоційну реакцію на новий формат навчання.

4. Статистично-порівняльне завдання:

Провести вихідний контроль знань, здійснити порівняльний аналіз результатів експериментальної та контрольної груп, виконати математико-статистичну обробку отриманих даних (за критерієм χ^2 Пірсона) для підтвердження достовірності та значущості виявлених змін.

3.2. Діагностика початкового рівня знань учнів

Передумовою об'єктивності педагогічного експерименту є перевірка однорідності вибірки. Для того щоб довести, що майбутнє зростання

успішності в експериментальній групі є наслідком саме впровадження 3D-моделювання, а не випадковим фактором чи початковою різницею в рівні підготовки учнів, на першому етапі дослідження (констатувальному) було проведено вхідне діагностування.

Експериментальною базою дослідження було обрано ДНЗ «Бучацьке професійно-технічне училище». У дослідженні взяли участь дві академічні групи учнів, які навчаються за спорідненими спеціальностями та мають однакову кількість годин на вивчення фізики.

Загальний обсяг вибірки на цьому етапі склав 52 респонденти. Для визначення вихідного рівня навчальних досягнень учням було запропоновано контрольну роботу за темою, що передувала експерименту («Основи динаміки»). Завдання були спрямовані на перевірку знання базових фізичних понять, вміння читати графіки та розв'язувати типові задачі. Оцінювання проводилося за 12-бальною шкалою, з подальшим розподілом результатів за чотирма рівнями: початковий (1–3 бали), середній (4–6 балів), достатній (7–9 балів) та високий (10–12 балів). Результати вхідного контролю узагальнено в Таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Рівні компетентності

Рівень компетентності	Контрольна група (КГ)	Експериментальна група (ЕГ)
Високий	6	5
Достатній	11	14
Середній	6	5
Початковий	3	2

Аналіз отриманих даних показує, що на початку експерименту успішність учнів в обох групах є співмірною. Більшість здобувачів освіти (як у КГ, так і в ЕГ) демонструють середній та достатній рівень знань, що є репрезентативним для даної вікової категорії.

Для наочного порівняння побудовано порівняльну діаграму (Рис. 3.1).

Оцінки груп до експеременту

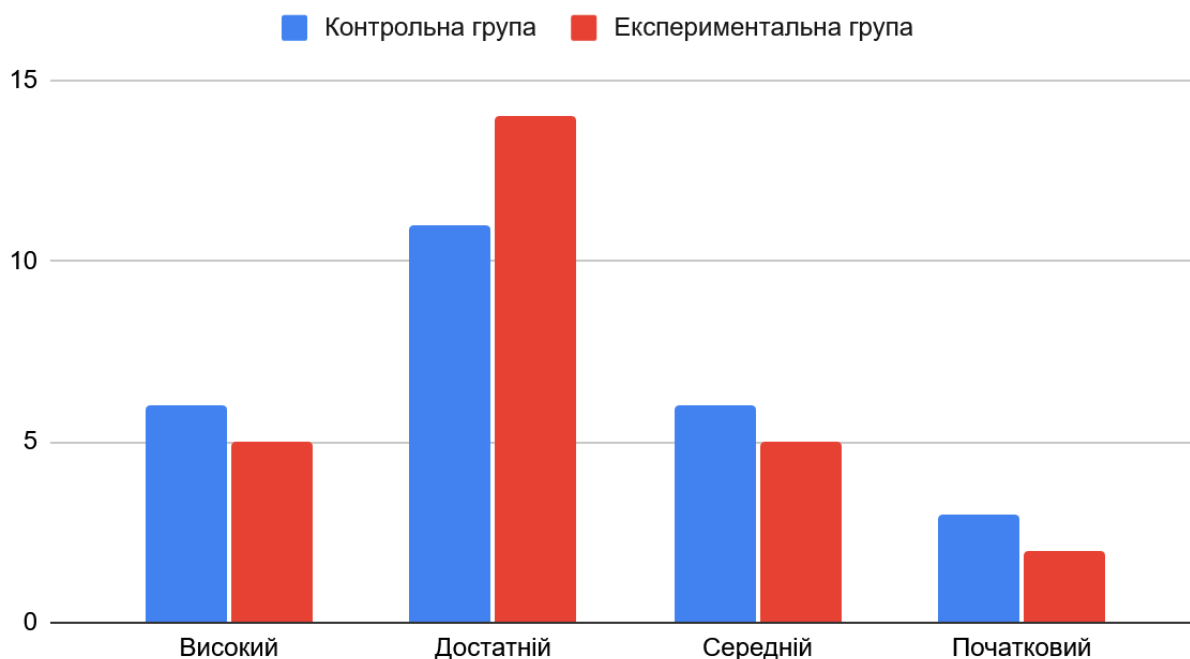


Рис.3.1. Діаграма розподілу рівнів навчальних досягнень учнів на констатувальному етапі

Як видно з діаграми, профілі успішності обох груп фактично дублюють один одного. Незначні відхилення у відсоткових показниках є статистично несуттєвими і не впливають на загальну картину однорідності вибірки.

3.3. Організація дослідження, методи та критерії ефективності

Апробація методики була реалізована здобувачем вищої освіти (автором роботи), Хомутом Тарасом Олеговичем, особисто у ДНЗ “Бучацьке професійно-технічне училище”. Важливо зазначити, що я, як автор, будучи магістрантом за освітньою програмою Середня освіта (Інформатика, математика, STEM-освіта) та маючи кваліфікацію бакалавра за профілем Середня освіта (Інформатика, математика, основи STEM-навчання), виступив єдиним викладачем в обох групах. Такий підхід забезпечив контроль над педагогічним фактором, що є необхідною умовою для підвищення внутрішньої валідності результатів експерименту.

У експерименті було залучено 52 учня першого курсу з двох груп з умовно однаковим рівнем підготовки. Експериментальна група (ЕГ) складається з 26 осіб, які розв'язували лабораторну роботу з фізики на тему “Динамометр” з використанням авторської 3D моделі динамометра. Контрольна група (КГ) теж складається з 26 осіб навчалася за традиційною для закладу методикою, яка передбачала використання фізичних динамометрів та тягарців.

Для вивчення змін у суб'єктивній сфері учнів під впливом розробленої методики було застосовано спеціалізоване анкетування (Додаток [А]), результати якого дозволили проаналізувати динаміку їхньої пізнавальної активності, а також оцінити рівень задоволеності якістю та зрозумілістю наданих навчальних інструкцій у процесі роботи з 3D-моделлю.

Для комплексного аналізу методичної ефективності запропонованого підходу в діяльності педагога було використано анкетування вчителів-експертів (Додаток [Б]) та проведено хронометраж робочого часу, спрямований на фіксацію середньої тривалості підготовки до занять. Застосування цих діагностичних інструментів дало змогу об'єктивно оцінити динаміку зменшення часових витрат на розробку навчальних матеріалів, а також проаналізувати рівень системності у впровадженні диференційованих завдань, що є визначальним показником для верифікації критеріїв методичної ефективності та педагогічної активності вчителя в умовах цифровізації навчання.

На завершальному етапі статистичного аналізу результатів дослідження, з метою об'єктивного підтвердження достовірності та значущості виявлених розбіжностей у рівнях навчальних досягнень між учнями експериментальної та контрольної груп, було застосовано математико-статистичний критерій χ^2 (хі-квадрат) Пірсона. Перевірка статистичних гіпотез здійснювалася при встановленому рівні значущості $\alpha=0,05$, що дозволило математично верифікувати успішність впровадженої методики та довести, що зафіксовані позитивні зміни в експериментальній групі не є випадковими, а безпосередньо зумовлені використанням розроблених анімаційних 3D-моделей у навчальному

процесі.

3.4. Аналіз та інтерпретація результатів експерименту

Аналіз результатів педагогічного експерименту, проведеного у Буцацькому професійно-технічному училищі, став вирішальним кроком для того, щоб підтвердити користь використання 3D-графіки у навчанні. Під час цієї перевірки ми побачили, що робота з живими моделями у Blender допомагає учням набагато краще розуміти складні фізичні та математичні закони, які раніше здавалися їм занадто важкими для сприйняття. Використання віртуального динамометра перетворило звичайні лабораторну роботу на цікаве дослідження, де кожен міг самостійно змінювати параметри та бачити результат на екрані в реальному часі. Порівнявши успіхи учнів, які використовували 3D-моделі, із результатами тих, хто вчився традиційно, і статистичні дані чітко показали, що 3D-технології значно підвищують рівень знань та зацікавленість предметом. У підсумку цей експеримент повністю довів нашу гіпотезу про те, що сучасне моделювання є великим помічником для вчителя, оскільки воно не тільки полегшує пояснення складних тем, а й розвиває у дітей важливі цифрові навички, які знадобляться їм у майбутньому.

Результати лабораторної роботи засвідчили значний якісний стрибок у навчальних досягненнях учнів Експериментальної групи (ЕГ) порівняно з Контрольною групою (КГ). Розподіл учнів за результатами лабораторної роботи представлено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2. Розподіл учнів за результатами лабораторної роботи

Рівень компетентності	Контрольна група (КГ), % (N=26)	Експериментальна група (ЕГ), % (N=26)
Високий	15.4%	34.6%
Достатній	46.1%	50%
Середній	26.9%	11.5%
Початковий	11.5%	3.8%

Для наочності порівняльної динаміки досягнень учнів візуалізовано демонструє рисунок 3.2.

Результати лабораторної роботи

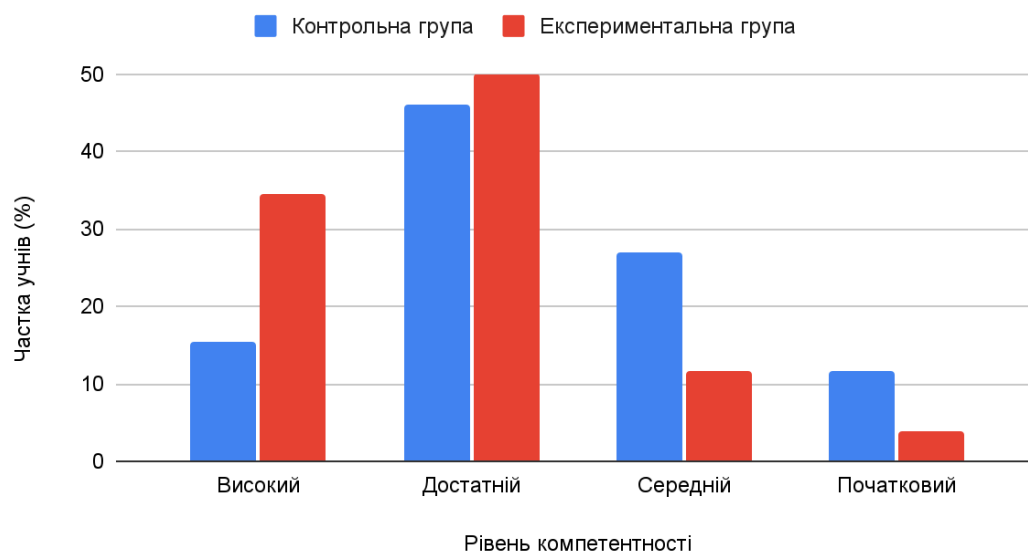


Рис. 3.2. Діаграма порівняльної динаміки досягнень учнів

Представлені результати чітко засвідчує успіх експерименту: учні, які працювали з 3D-моделями у Blender, показали значно кращі результати порівняно з тими, хто навчався за традиційною методикою. Видно помітне зростання кількості високих оцінок та суттєве зменшення низьких показників в експериментальній групі, що безпосередньо підтверджує ефективність візуалізації фізичних процесів.

Для математичного підтвердження того, що кращі результати експериментальної групи порівняно з контрольною є закономірним наслідком впровадженої методики, а не випадковим збігом, проведено статистичну обробку даних за допомогою критерію χ^2 (хі-квадрат) Пірсона. Ця перевірка дозволить об'єктивно верифікувати успішність використання 3D-моделі у лабораторній роботі та довести статистичну значущість виявлених відмінностей.

Статистичні розрахунки проводяться на основі даних таблиці 3.1 за допомогою таблиць спряженості, що охоплюють чотири рівні компетентностей та дві групи учасників. Перевірка статистичних гіпотез здійснювалася при

критичному рівні значущості $\alpha=0,05$ та числі ступенів свободи $df=3$, що дозволило забезпечити високу точність та математичну обґрунтованість отриманих висновків щодо переваг розробленої методики.

На основі частот розподілу оцінок у двох групах, за формулою Пірсона $\chi^2 = \sum \frac{(O-E)^2}{E}$, було обчислено емпіричне і критичне значення критерію. Результати обчислень: $\chi_{\text{емп}}^2 = 8,22$, $\chi_{\text{крит}}^2 = 7,815$. Зіставлення отриманих значень показує, що розраховане емпіричне значення перевищує критичне. Оскільки нерівність $\chi_{\text{емп}}^2 > \chi_{\text{крит}}^2$ виконується, нульова гіпотеза (H_0) відхиляється, а альтернативна гіпотеза (H_1) приймається. З ймовірністю 95% доведено, що впровадження методики використання анімаційної 3D-моделі сприяло суттєвому підвищенню рівня засвоєння навчального матеріалу. Позитивна динаміка в експериментальній групі є не випадковою та статистично значущою.

Окрім оцінок, також було проаналізовано, як нова методика вплинула на роботу вчителя та враження самих учнів, і результати виявилися позитивними. Дослідження показало, що учні сприйняли такий формат із великим ентузіазмом: їм було набагато цікавіше працювати з віртуальним приладом, ніж з фізичним, що помітно підвищило їхнє бажання вчитися. Усе це стало додатковим підтвердженням нашої гіпотези про те, що 3D-моделювання робить навчання не тільки якіснішим, а й значно привабливішим.

Важливою складовою експериментальної перевірки стало вивчення суб'єктивної оцінки нової методики самими учасниками освітнього процесу. Проведене анкетування серед учнів експериментальної групи дозволило проаналізувати мотиваційний, когнітивний та ергономічний аспекти роботи з віртуальною моделлю динамометра в середовищі Blender.

Абсолютна більшість респондентів ствердно відповіли на запитання, чи допомогла 3D-модель зрозуміти принцип роботи приладу. Учні зазначили, що динамічна візуалізація процесу деформації пружини та автоматична зміна

показників на шкалі дозволили їм краще усвідомити зв'язок між прикладеною силою та фізичним наслідком. Це підтверджує тезу про те, що інтерактивна 3D-графіка сприяє глибшій інтеріоризації знань порівняно зі статичними ілюстраціями.

Результати опитування засвідчили значний позитивний вплив на емоційно-мотиваційну сферу. 92,9% опитаних висловили однозначне бажання використовувати подібні 3D-моделі при вивченні інших тем курсу фізики. У відкритих відповідях учні характеризували процес як «цікавіший», «живіший» та «крутіший» порівняно з традиційними методами, що свідчить про успішну реалізацію завдання щодо підвищення інтересу до STEM-дисциплін.

Попри те, що Blender є професійним програмним забезпеченням, 71,4% учнів визнали інтерфейс та роботу з моделлю «інтуїтивно зрозумілими» та «дуже легкими». Решта 28,6% зіткнулися лише з дрібними труднощами, які не завадили виконанню роботи. Це, у поєднанні зі 100% зрозумілістю інструкцій, доводить, що адаптовані моделі можуть бути успішно імплементовані в навчальний процес навіть без поглибленої попередньої підготовки учнів.

Якісний аналіз відкритих відповідей виявив важливий педагогічний ефект: учні чітко розмежовують віртуальний та реальний експеримент. У коментарях зазначалося, що у віртуальному середовищі «все працює передбачувано і без похибок», тоді як реальний прилад має нюанси (тертя, тремтіння стрілки). Це свідчить про те, що 3D-модель успішно виконала функцію ідеалізованого об'єкта, дозволивши учням зосередитися на вивченні фізичного закону в чистому вигляді, не відволікаючись на інструментальні похибки.

Аналіз пропозицій учнів показав запит на подальшу гібридизацію навчання. Серед побажань — додавання інтерактивних відео-прикладів та можливість безпосереднього порівняння результатів віртуального та реального вимірювання в рамках однієї роботи.

Невід'ємною складовою верифікації результатів педагогічного експерименту стало проведення експертного опитування серед викладачів

фізики та спеціальних дисциплін Буцацького професійно-технічного училища. Метою цього етапу було отримання фахової оцінки методичної доцільності, ергономічності та дидактичного потенціалу впровадження 3D-моделювання у навчальний процес.

Результати опитування продемонстрували повний консенсус (100%) серед опитаних педагогів щодо ключових аспектів методики. Усі експерти визнали інтегрований формат лабораторної роботи (поєднання фізичного експерименту з 3D-моделюванням) зручним та ефективним. Максимальна оцінка (5 із 5 балів), виставлена всіма респондентами за критерієм «допомога у розумінні принципу дії приладу», свідчить про те, що розроблена візуалізація успішно вирішує одну з головних педагогічних проблем — подолання бар'єру абстракції.

Викладачі одностайно підтвердили доцільність використання запропонованої методики для реалізації міжпредметних зв'язків. Експерти вбачають у використанні середовища Blender не лише засіб візуалізації фізичних законів, а й інструмент розвитку цифрової компетентності учнів. Позитивна реакція на ідею введення «творчого елементу» (самостійного моделювання учнями модифікацій приладів) свідчить про готовність педагогічного колективу до переходу від репродуктивних методів навчання до конструктивістських та проєктних технологій.

Аналіз відкритих відповідей дозволив окреслити перспективні напрями подальшого впровадження 3D-технологій. Викладачі-практики наголошують на критичній необхідності подібних моделей у розділах, де натурний експеримент є складним або неможливим. Зокрема, було виокремлено такі пріоритетні теми:

1. Оптика: для побудови та налаштування складних оптичних систем.
2. Молекулярна фізика та термодинаміка: для візуалізації невидимих мікростанів газів та теплових процесів.
3. Електродинаміка: для демонстрації розподілу електромагнітних полів.
4. Механіка: для моделювання коливальних процесів.

У своїх відгуках педагоги зазначили, що Blender дозволяє створювати «динамічні сцени», які роблять навчання «наочним та інтерактивним». Це

підтверджує, що впроваджена методика не просто дублює традиційні засоби, а виводить викладання на якісно новий рівень, дозволяючи пояснювати складні концепції у доступній та сучасній формі, що відповідає запитам цифрового покоління учнів.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі здійснено комплексну експериментальну верифікацію ефективності розробленої методики використання засобів 3D-графіки у навчальному процесі закладів професійно-технічної освіти. Педагогічний експеримент, проведений на базі ДНЗ «Буцацьке професійно-технічне училище», охопив 52 здобувачі освіти (26 осіб у контрольній та 26 в експериментальній групах).

На констатувальному етапі шляхом вхідного діагностування було встановлено однорідність вибірки: відсутність статистично значущої різниці в рівнях початкової підготовки учнів обох груп забезпечила об'єктивність подальшого порівняння. За результатами формувального етапу, в ході якого навчання в експериментальній групі здійснювалося з використанням інтерактивних моделей у середовищі Blender 3D, зафіксовано суттєву позитивну динаміку навчальних досягнень. Порівняльний аналіз зрізів знань показав зростання якісного показника успішності в експериментальній групі, що проявилось у збільшенні кількості оцінок високого та достатнього рівнів. Учні продемонстрували глибше розуміння фізичної сутності досліджуваних явищ (зокрема закону Гука та статистичних закономірностей) завдяки можливості візуального спостереження динамічних процесів.

Достовірність отриманих результатів підтверджено методами математичної статистики. Розрахунок критерію однорідності χ^2 (хі-квадрат) Пірсона засвідчив, що емпіричне значення ($\chi^2_{\text{емп}} = 8,22$) перевищує критичне значення ($\chi^2_{\text{крит}} = 7,815$ для рівня значущості $\alpha=0,05$). Це дало підстави відхилити нульову гіпотезу про випадковість змін і статистично довести, що

підвищення рівня знань є закономірним наслідком впровадження запропонованої методики.

Важливим компонентом валідизації дослідження став аналіз суб'єктивного сприйняття учасників освітнього процесу. Анкетування учнів виявило високий мотиваційний потенціал 3D-моделювання: 100% респондентів експериментальної групи зазначили покращення розуміння навчального матеріалу, а якісний аналіз відповідей підтвердив ефективність проведення віртуальних експериментів в «ідеальних умовах». Паралельне експертне опитування викладачів підтвердило методичну цінність розробки, її відповідність принципам STEM-освіти та перспективність масштабування на інші розділи фізики.

Таким чином, результати третього розділу дозволяють стверджувати, що гіпотеза дослідження знайшла своє підтвердження: інтеграція технологій 3D-моделювання у навчальний процес сприяє не лише підвищенню академічної успішності, а й формуванню цифрових компетентностей та стійкої пізнавальної мотивації учнів.

ВИСНОВКИ

Результати проведеного кваліфікаційного дослідження дають підстави стверджувати, що проблема інтеграції засобів тривимірної графіки в освітній процес є не лише актуальною, а й критично важливою для модернізації сучасної STEM-освіти. Теоретичний аналіз науково-методичної літератури дозволив констатувати, що в умовах цифрової трансформації суспільства відбувається зміна освітніх парадигм: традиційні засоби статичної наочності поступово вичерпують свій ресурс, поступаючись місцем інтерактивним симуляціям. Визначено, що анімаційні 3D-моделі виступають потужним когнітивним інструментом, який дозволяє візуалізувати приховані механізми фізичних явищ та абстрактні математичні концепції, сприяючи формуванню в учнів цілісної наукової картини світу та розвитку просторового мислення.

У ході роботи було обґрунтовано вибір середовища Blender 3D як оптимальної технологічної платформи для створення навчального контенту. Детальне вивчення інструментарію програми засвідчило, що наявність вбудованого фізичного рушія (Rigid Body Physics) та системи математичних драйверів дозволяє вийти за межі художнього моделювання, створюючи фізично коректні симуляції. Розроблені в рамках дослідження моделі — віртуальний динамометр, дошка Гальтона та гіроскопічна система — продемонстрували здатність програмного забезпечення точно відтворювати закони механіки та стохастичні процеси, що забезпечує наукову достовірність віртуального експерименту.

Практична значущість дослідження полягає у розробці комплексної методики використання 3D-моделей, яка охоплює різні рівні пізнавальної активності учнів: від демонстраційного (спостереження) до конструктивно-дослідницького (параметричні зміни умов симуляції). Запропоновано концепцію «гібридного навчання», що передбачає поєднання натурного та віртуального експериментів, завдяки чому учні отримують можливість аналізувати фізичні закони в «ідеальних» умовах, нівелюючи інструментальні похибки реального обладнання.

Ефективність запропонованого підходу підтверджено результатами педагогічного експерименту, проведеного на базі ДНЗ «Бучацьке професійно-технічне училище». Статистичний аналіз даних за критерієм χ^2 Пірсона ($\chi^2_{\text{емп}} = 8,22$) засвідчив значущу позитивну динаміку навчальних досягнень учнів експериментальної групи порівняно з контрольною. Окрім підвищення академічної успішності, результати дослідження зафіксували зростання інтересу учнів до вивчення точних наук та формування у них ключових цифрових компетентностей, що дозволяє рекомендувати розроблену методику до впровадження в освітній процес закладів середньої та професійної освіти.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИЙ ДЖЕРЕЛ

1. Андрієвська В. М. Особливості вивчення 3D-графіки в ракурсі STEM-освіти / В. М. Андрієвська, О. Б. Іваха // Наумовські читання : матеріали XIX наук.-метод. конф. здобувачів вищої освіти та молодих учених, присвяч. року мат. освіти в Україні, Харків, 23-24 листоп. 2021 р. / [редкол.: Пономарьова Н. О та ін.]. – Харків, 2022. – С. 174–175.
2. Балик Н. Р., Барна О. В. Впровадження STEM–освіти у навчальних закладах: етапи та моделі // STEM–освіта та шляхи її впровадження в навчально–виховний процес: збірник матеріалів І регіональної науково–практичної вебконференції (м. Тернопіль, 24 травня 2017). Тернопіль: ТОКІППО, 2017. С. 3–8.
3. Балик Н. Р., Барна О. В., Шмигер Г. П. Впровадження STEM–освіти у педагогічному університеті // Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання: досвід, тенденції, перспективи: матеріали Всеукраїнської науково–практичної Інтернет–конференції з міжнародною участю (м. Тернопіль, 9–10 листопада 2017). Тернопіль: ТНПУ ім. В. Гнатюка, 2017. С. 11–14.
4. Балик Н. Р., Шмигер Г. П. Підходи та особливості сучасної STEM-освіти // Фізико-математична освіта: науковий журнал. 2017. Вип. 2(12). С. 26–30.
5. Бугаєць Н. О. Моделювання анімаційних наочностей засобами графічного середовища програми Maxima / Н. О. Бугаєць // Інформаційні технології і засоби навчання. - 2015. - Т. 47, вип. 3. - С. 67-79. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ITZN_2015_47_3_8.
6. Гайда В. Я., Бабовал Д. С. Роль вчителів у створенні стимулюючого STEM-середовища // Сучасні цифрові технології та інноваційні методики навчання: досвід, тенденції, перспективи: матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції (7–8 листопада 2024 р.). Тернопіль: ТНПУ ім. В. Гнатюка, 2024. С. 183.

7. Величко С. П., Слободяник О. В. Віртуальний фізичний експеримент у системі засобів навчання фізики. *Наукові записки. Серія: Педагогічні науки*. 2021. Вип. 155. С. 64–69.
8. Гриб'юк О. О. Візуалізація навчального матеріалу як тренд сучасного освітнього середовища. *Фізико-математична освіта*. 2020. Вип. 2 (24). С. 40–47.
9. Державний стандарт базової середньої освіти: постанова Кабінету Міністрів України від 30 вересня 2020 р. № 898. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-deyaki-pitannya-derzhavnih-standartiv-povnoyi-zagalnoyi-serednoyi-osviti-i300920-898> (дата звернення: 17.10.2025).
10. Державний стандарт базової і повної загальної середньої освіти. URL: https://osvita.ua/legislation/Ser_osv/76886/ (дата звернення: 20.07.2025).
11. Доценко С. О. STEM-освіта: науковий дискурс та освітні практики / С. О. Доценко // Рідна школа : наук.-метод. журн. – 2021. – № 3. – С. 31–35.
12. Дрокіна, А. STEM-ОСВІТА ЯК ЕФЕКТИВНИЙ НАПРЯМ РЕАЛІЗАЦІЇ КЛЮЧОВИХ ПОЛОЖЕНЬ КОНЦЕПЦІЇ НОВОЇ УКРАЇНСЬКОЇ ШКОЛИ // Освіта. Інноватика. Практика. 2024. 12(3). С. 20–25. DOI: 10.31110/2616-650X-vol12i3-003.
13. Дубова Н. В. Психолого-педагогічні основи формування елементів дизайнерського мислення старшокласників на уроках технології // Наукові записки. Серія: Педагогічні науки. 2021. № 3. С. 11–15.
14. Жалдак М. І., Михалін Г. О., Беляйкін Д. Є. Елементи стохастики з комп'ютерною підтримкою : посібник для вчителів. Київ : НПУ імені М. П. Драгоманова, 2012. 187 с.
15. Засекіна Т. М. Реалізація STEM-освіти в системі профільного навчання. *Наукові записки Малої академії наук України*. 2020. № 1 (17). С. 25–32.
16. Інженерне мислення: що це таке і навіщо його розвивати. URL: <https://budni.robota.ua/career/inzhenerne-mislennya-shho-tse-take-i-navishho-jogo-rozvivati> (дата звернення: 14.06.2025).

17. Концепція розвитку природничо-математичної освіти (STEM-освіти) до 2027 року : розпорядження Кабінету Міністрів України від 5 серпня 2020 р. № 960-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/960-2020-%D1%80#Text> (дата звернення: 10.03.2025).
18. Кобися А. П., Кобися В. М. Особливості застосування Blender 3D в освітньому процесі. *Фізико-математична освіта*. 2021. Вип. 1 (27). С. 65–70.
19. Крутова Н. І. Створення проєктів як результат STEM-навчання // STEM орієнтований підхід до навчання в умовах Нової української школи: посібник / за заг. ред. А. Л. Черній. Рівне, 2020. С. 23–28.
20. Мосіюк О. О. Переваги використання програмного пакету тривимірної графіки Blender 3D у процесі підготовки майбутнього вчителя інформатики. Проблеми інформатизації навчального процесу в школі та вищому педагогічному навчальному закладі. 2017. С. 127-128.
21. Морзе Н. В., Варченко-Троценко Л. О., Гладун М. А. Основи робототехніки: навчальний посібник. Кам'янець-Подільський: ПП Буйницький О. А., 2016. 184 с.
22. Морзе Н. В., Гладун М. А., Дзюба С. М. Формування ключових і предметних компетентностей учнів робототехнічними засобами STEM-освіти // Інформаційні технології і засоби навчання. 2018. Т. 65, № 3. С. 37–52.
23. Морзе Н., Струтинська О., Умрик М. Освітня робототехніка як перспективний напрям розвитку STEM-освіти // Open Educational E-environment of Modern University. 2018. Вип. 5. С. 178–187.
24. Проєктна діяльність у технологічній освіті: навч. посіб. / за ред. О. В. Сухомлинської. Кривий Ріг: КДПУ, 2020. 295 с.
25. Семеріков С. О., Теплицький І. О., Соловйов В. М. Комп'ютерне моделювання у навчальному процесі з фізики : навч. посіб. Кривий Ріг : КДПУ, 2019. 210 с.
26. Сліпухіна І. А., Чернецький І. С., Поліхун Н. І. STEM-освіта: досвід упровадження в країнах ЄС та США. *Педагогічні науки: теорія, історія, інноваційні технології*. 2017. № 6. С. 165–174.

27. Ткачук Г. В. Використання технологій 3D-моделювання та 3D-друку у підготовці майбутніх вчителів інформатики. *Інформаційні технології і засоби навчання*. 2019. Т. 73, № 5. С. 182–194.
28. Хомут Т. О., Лещук С. О. Використання Blender 3D для інтеграції STEM-освіти: візуалізація та анімація фізичних наукових концепцій // Сучасні цифрові технології та інноваційні методики навчання: досвід, тенденції, перспективи: матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції (7–8 листопада 2024 р.). Тернопіль: ТНПУ ім. В. Гнатюка, 2024. С. 227-228.
29. Хомут Т. О., Лещук С. О. Формування STEAM-компетентностей засобами моделювання фізичних процесів у Blender 3D // Сучасні цифрові технології та інноваційні методики навчання: досвід, тенденції, перспективи: матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції (6–7 листопада 2025 р.). Тернопіль: ТНПУ ім. В. Гнатюка, 2025. С. 309
30. Чучаліна Ю. М. Стратегії адаптації stem-освіти для підвищення інклюзивності навчання в початкових класах: аналітичний огляд // Інноваційна педагогіка. 2024. Вип. 71, Т. 2. С. 119 – 125.
31. Яновський А., Яновська Л. Реалізація міжпредметних зв'язків при вивченні анімації у тривимірному графічному редакторі. Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Випуск 3 / 2022 (134)
32. Alemdar M., Lingle J., Rosen J. The effect of middle school engineering curriculum on students' engineering identity development // *Journal of Pre-College Engineering Education Research*. 2021. Vol. 11(1). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1749772821000464> (дата звернення: 12.04.2025).
33. Araujo F., Andrade A., de Sousa A. Engineering thinking: The expert's perspective // *Computers in Human Behavior*. 2021. Vol. 116. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0747563221000273> (дата звернення: 12.04.2025).

34. Balyk N., Shmyger G., Vasylenko Y., Oleksiuk V., Skaskiv A. STEM-Approach to the Transformation of Pedagogical Education // *E-learning and STEM Education*. Katowice Cieszyn: University of Silesia, 2019. Vol. 11. P. 109–123.
35. Bers M., Seddighin S., Sullivan A. Ready for Robotics: Bringing Together the T and E of STEM in Early Childhood Teacher Education // *Journal of Technology and Teacher Education*. 2013. Vol. 21, № 3. P. 355–377.
36. Blender 4.0 Reference Manual. Blender Foundation. URL: <https://docs.blender.org/manual/en/latest/> (дата звернення: 10.12.2024).
37. Clarebout, G., Elen, J., Johnson, W.L. & Shaw, E. (2002). Animated Pedagogical Agents: An Opportunity to be Grasped?. *Journal of Educational Multimedia and Hypermedia*, 11(3), 267-286. Norfolk, VA: Association for the Advancement of Computing in Education (AACE). Retrieved June 4, 2025 from <https://www.learntechlib.org/primary/p/9270/>.
38. I. Staribratov and N. Manolova, “3D technologies in STEAM education,” *Discover Education*, vol. 3, no. 1, p. 92, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s44217-024-00181-z>
39. J. Llerena Izquierdo, “Idear con Blender,” 2023. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/26536>
40. Pak B., Verbeke J. Design Studio 2.0: Augmenting Reflective Architectural Design Learning // *arXiv preprint*. 2015. Computer Science > Human-Computer Interaction.
41. L. Soni, A. Kaur, and A. Sharma, “A Review on Different Versions and Interfaces of Blender Software,” in 2023 7th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI). IEEE, apr 2023, pp. 882–887. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICOEI56765.2023.10125672>
42. Unsworth, L. (2020). A Multidisciplinary Perspective on Animation Design and Use in Science Education. In: Unsworth, L. (eds) *Learning from Animations in Science Education*. Innovations in Science Education and Technology, vol 25. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-56047-8_1

ДОДАТКИ

Додаток А

Опитування: Використання 3D-моделі динамометра в лабораторній роботі

1. Чи було вам зручно працювати з 3D-моделлю динамометра в Blender?

- Так, все було інтуїтивно
- Переважно так, були дрібні труднощі
- Було складно
- Було дуже важко

2. Наскільки зрозумілою була інструкція до лабораторної роботи?

- Повністю зрозуміла
- Загалом зрозуміла, дещо незрозуміло
- Потребує значного доопрацювання

3. Чи допомогла 3D-модель краще зрозуміти принцип роботи динамометра?

- Так, значно
- Частково
- Не допомогла взагалі

4. Наскільки легко вам було виконати вимірювання за допомогою моделі?

- Дуже легко
- Достатньо легко
- Складно
- Дуже складно

5. Чи виникали у вас технічні проблеми під час роботи в Blender?

- Не виникало
- Іноколи виникали, але не заважали
- Через проблеми було важко виконати роботу

6. Чи хотіли б ви працювати з подібними 3D-моделями й у інших темах з фізики?

- Так
- Можливо
- Не дуже

- Ні

7. Як ви оцінюєте загальну складність лабораторної роботи? (Шкала від 1 до 5)

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5

8. Чи відчули ви різницю між віртуальним моделюванням і роботою з реальним приладом? Опишіть.

- *(Поле для розгорнутої текстової відповіді)*

9. Які покращення ви б запропонували для цієї лабораторної?

- *(Поле для розгорнутої текстової відповіді)*

Додаток Б

Опитування для вчителів: Використання 3D-моделі динамометра

1. Чи є для вас зручним формат лабораторної роботи, що поєднує 3D-модель і фізичні вимірювання?

- Зручно
- Незручно

2. Чи достатньо інструкцій, чи варто додати детальніший опис кроків у Blender?

- Достатньо
- Недостатньо

3. Чи хотіли б ви впроваджувати подібні 3D-моделі й для інших тем з фізики?

- Так
- Ні

4. Наскільки, на вашу думку, 3D-модель динамометра допомагає студентам краще зрозуміти принцип дії приладу? (Оцінка за шкалою)

- 1 (Не допомагає)
- 2
- 3
- 4
- 5 (Допомагає)

5. Чи бачите ви потенціал використання цієї моделі для міждисциплінарних завдань?

- Так
- Ні

6. Чи варто додати творчий елемент, наприклад, невелике моделювання студентами власної модифікації динамометра?

- Так
- Ні

7. Чи хотіли б ви впроваджувати подібні 3D-моделі й для інших тем з фізики?

- Так
- Ні

8. Чи бачите ви потенціал використання подібних моделей в інших темах або розділах фізики? Поясніть.

- *(Поле для розгорнутої текстової відповіді)*

Впровадження результатів кваліфікаційного дослідження на наукових конференціях

