

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХЕРСОНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет комп'ютерних наук, фізики та математики
Кафедра комп'ютерних наук та програмної інженерії

**ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ЗАКОНІВ І ЯВИЩ З ФІЗИКИ В 10 КЛАСІ ЗА
ТЕХНОЛОГІЄЮ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ**

Кваліфікаційна робота (проект)
на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

Виконав: здобувач 4 курсу 12-441
Спеціальності F2 Інженерія
програмного забезпечення
Освітньо-професійної програми
Інженерія програмного забезпечення
Яворський Олександр
Олександрович

Керівник кандидат фізико-
математичних наук, доцент Кравцов Г.М.

Рецензент:

Херсон – Івано-Франківськ – 2026

ЗМІСТ

ВСТУП	Ошибка! Закладка не определена.
РОЗДІЛ 1. Технології доповненої реальності	5
1.1. Типи і застосування доповненої реальності у різних сферах	5
1.2. Електронні освітні ресурси з використанням доповненої реальності	6
1.3. Програмні засоби створення програм доповненої реальності	9
РОЗДІЛ 2. Моделювання програмних модулів навчального призначення для мобільних пристроїв за технологією доповненої реальності	12
2.1. Використання AR технологій у навчальному процесі	12
2.1.1. Переваги і недоліки AR технологій у освіті	14
2.2. Технологія Unity3D	16
2.2.1. Основні поняття рушія	16
2.2.2. Порівняльний аналіз Unity з альтернативними середовищами	19
2.2.3. Особливості реалізації AR-застосунків	22
2.3. Моделювання мультимедійних 3D об'єктів навчального призначення з використанням технологій доповненої реальності	24
2.3.1. Порівняльний аналіз Blender з Maya і 3ds Max	27
РОЗДІЛ 3. Проектування та розроблення 3D-об'єктів навчального призначення для мобільних пристроїв з використанням AR	30
3.1. Сценарії демонстрації фізичних процесів у комп'ютерних програмах навчального призначення	30
3.2. Проектування 3D об'єктів доповненої реальності з вивчення фізичних законів у курсі фізики 10 клас	33
3.3. Створення програмного забезпечення візуалізації дії фізичних законів у курсі фізики в 10 класі. Розділ 1. Механіка	37
ВИСНОВКИ	48

ВСТУП

Сучасний світ дуже швидко впроваджує нові технології. Те що колись вважалось неможливим, зараз стає повсякденністю. Сьогоднішні учні - це покоління яке виросло з гаджетами у руках. Для них візуальні образи, динамічні картинки та інтерактивна взаємодія – природний спосіб сприйняття інформації. Проте шкільна фізика часто є важким і заплутаним академічним предметом. Сухі формули, статичні ілюстрації у підручниках та абстрактні поняття, невидимі неозброєним оком (наприклад, електричний струм, магнітна індукція та структура атома), ускладнюють розуміння цієї науки.

Актуальність теми доповненої реальності (AR) як провідної галузі іммерсивних технологій відкриває шлях до принципово нових можливостей у поданні фізичних явищ, роблячи їх зрозумілими та візуально легко сприйнятими за допомогою моделей. Це має критично важливе значення в галузі фізики, предмета, який часто викликає труднощі у студентів через складність теорії та обмежене лабораторне обладнання для демонстрації певних ефектів. Інтеграція інструментів AR до освітнього процесу, особливо у змішаному навчанні, стимулює інтерес та залученість студентів. Це також сприяє розвитку їх цифрових компетенцій та набуття практичних навичок. Ця методологія повністю відповідає ключовим цілям сучасної педагогіки: створенню інноваційного освітнього середовища, забезпеченню рівного доступу до високоякісної інформації та ефективної підготовки молоді до успішної кар'єри у світі високих технологій. [1]

Об'єктом дослідження є процес навчання фізики в старшій школі.

Предметом дослідження є методика застосування технології доповненої реальності для візуалізації фізичних законів і явищ у курсі фізики 10 класу.

Мета дослідження полягає у теоретичному обґрунтуванні та розробці методики візуалізації фізичних законів і явищ у курсі фізики 10

класу засобами технологій доповненої реальності (AR) для підвищення ефективності навчального процесу та розвитку пізнавальної мотивації учнів.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати типи та сфери застосування технологій доповненої реальності, а також існуючі програмні засоби для їх створення.
2. Обґрунтувати використання середовища Unity3D для моделювання навчальних мультимедійних 3D-об'єктів.
3. Проаналізувати сучасний стан та функціональні можливості існуючих електронних освітніх ресурсів з елементами доповненої реальності.
4. Визначити особливості та методику використання AR-технологій безпосередньо у навчальному процесі під час вивчення фізики.
5. Розробити сценарії демонстрації фізичних процесів та спроектувати 3D-моделі для візуалізації законів фізики в 10 класі.
6. Створити програмне забезпечення з елементами доповненої реальності для вивчення розділу «Механіка».

РОЗДІЛ 1. Технології доповненої реальності

1.1. Типи і застосування доповненої реальності у різних сферах

З огляду на те, як зараз розвиваються іммерсивні технології у світі, відразу впадає той факт, що існує недостатньо підходів до класифікації доповненої реальності. Доповнена реальність, простими словами, це коли віртуальні об'єкти органічно вплітаються в реальний простір. Але не варто все зводити до цього. Для більш глибокого розуміння AR необхідно розглянути кілька ключових аспектів: як саме представляється інформація, яка її запускає (що таке візуалізація) (контекстні тригери) і які елементи допомагають орієнтуватися користувачеві (візуальна підтримка). [2] Якщо заглибитись у технічну сторону, системи доповненої реальності діляться за типами пристроїв, на яких вони працюють. Найбільш популярними є мобільні пристрої: телефони, планшети. Для них необхідно завантажити спеціальні програми з підтримкою AR, і зараз вони найпоширеніші. Також використовуються стаціонарні пристрої – телевізори, комп'ютерні монітори. Тут AR часто застосовується для трансляції спортивних подій з додаванням графіки або створення інтерактивних атласів. [2] Існують також вузькоспеціалізовані гаджети: окуляри доповненої реальності, шоломи для пілотів, перспективні розробки, такі як AR-лінзи. Області застосування різноманітні, і тут можливості доповненої реальності справді широкі. Ця технологія стала частиною як повсякденного життя, так і професійної діяльності. AR особливо часто використовується в дизайні та роздрібній торгівлі. Доповнена реальність допомагає «приміряти» об'єкт у просторі перед покупкою: можна оцінити, як виглядатимуть меблі у вітальні чи рослини у саду. Це серйозно допомагає під час виборів. Аналогічний підхід використовується в архітектурі та будівництві. За допомогою AR можна побачити, як виглядатиме будівля на будмайданчику до початку робіт, або заглянути під штукатурку, щоб знайти приховані комунікації. [2]

1.2 Електронні освітні ресурси з використанням доповненої реальності

У міру переходу освіти в цифровий світ стає очевидним, що ресурси електронного навчання з використанням доповненої реальності є справжнім проривом. Порівняно з віртуальною реальністю, яка потребує повного занурення і часто коштує великих грошей, ресурси доповненої реальності простіші та доступніші. Вони накладають цифрові зображення, відео чи графіку безпосередньо на реальний світ – все, що вам потрібно, це звичайна камера на смартфоні чи планшеті. Цей підхід особливо добре працює в умовах BYOD («Bring Your Own Device», або «принеси свій пристрій»), коли студенти використовують свої смартфони і стають активними учасниками навчального процесу. [3]

У ході аналізу джерел було виявлено декілька цифрових навчальних матеріалів та застосунків для мобільних пристроїв, які активно інтегруються у освітній процес та групуються відповідно до тематичної галузі.

Для вивчення астрономії та фізики ефективно використовувати програму «AR Solar System». Цей ресурс дозволяє візуалізувати Сонячну систему в голографічному форматі: користувач бачить на екрані 3D моделі планет, може спостерігати за їх рухом по орбітах і досліджувати космічний простір. В галузі хімії значний потенціал має ресурс «MEL Chemistry» (зокрема, його VR/AR-компоненти). [4] Додаток містить уроки, що відповідають шкільній програмі, та дозволяє візуалізувати структуру атома або електронні орбіталі, а також проводити безпечні віртуальні експерименти, наприклад, збирати молекули в інтерактивній лабораторії. Дослідники також звертають увагу на додаток «Electricity AR», який зазвичай використовується для візуалізації лабораторного обладнання та виконання лабораторних робіт з фізики, що є особливо актуальним в умовах дистанційного навчання. [4]

Для кращого розуміння просторового мислення та засвоєння знань з геометрії вчені радять звернути увагу на додаток «CleverBooks Geometry». Воно використовує архітектурно-будівельний метод, надаючи учням можливість працювати із тривимірними AR-моделями геометричних тіл, що значно полегшує засвоєння шкільної програми. [4]

Для вивчення основ інженерії та архітектури існують такі програми, як «Bridges AR» і «Skyscrapers AR». Перша дозволяє детально вивчити конструкції відомих мостів (наприклад, з висоти пташиного польоту), а друга – дослідити архітектурні рішення найвідоміших хмарочосів світу. [4]

Якщо учень хоче вивчати історію та історію мистецтв, велику роль відіграє додаток «Civilisations AR», створений BBC. Воно надає можливість віртуально доторкнутися до стародавніх артефактів і пам'ятників, знайдених у музеях, але дозволяє взаємодіяти з ними безпосередньо в класі. Для стимуляції дитячої уяви, а також зниження стресу та розвитку дрібної моторики використовується програма «Quiver», яка дозволяє відтворювати моделі зображень, намальованих самими учнями.[4]

Доповнена реальність (AR) відкриває нові можливості в інклюзивній освіті, надаючи технології та програми для людей з різними видами інвалідності. Спеціально для людей з порушеннями слуху було створено інноваційні AR-окуляри, які містять програмне забезпечення для розпізнавання голосових команд. Насправді це рішення втілює ідею «миттєво генерованих субтитрів», відображаючи вимовлені співрозмовником слова у поле зору користувача. Крім того, технологія здатна розпізнавати важливі для безпеки звуки навколишнього середовища - наприклад, автомобільні або залізничні гудки, сигнали тривоги або сигнали світлофора - і сповіщати про них. На ринку вже існують такі інструменти, як Siri, Dragon Naturally Speaking або RogerVoice, і, незважаючи на це, в цій галузі, як і раніше, існують технічні складності, викликані необхідністю значного поліпшення мікрофонних

систем та алгоритмів для ефективного відокремлення мови від стороннього шуму. [1] Для людей із порушеннями зору створено спеціальні пристрої. Вони перетворюють видиму інформацію на звуки. Це значно допомагає людям орієнтуватись на вулицях. Ці пристрої можна порівняти із персональним помічником. Вони попереджають людей про інші речі навколо, наприклад, про людей, автомобілі, дорожні знаки або світлофори. Завдяки цьому люди можуть пересуватися без сторонньої допомоги, що для них є дуже важливим. Існують програми, які допомагають людям із порушеннями зору. До таких програм належать Google Goggles, Word Lens, vOICe та інші. Також є спеціальні програми, що читають текст на екрані або збільшують його для зручності читання. Ці додатки значно допомагають миттєво розпізнавати друковані знаки та слова та перекладати їх у мову, що дозволяє учням отримувати інформацію природним чином, усуваючи необхідність обов'язкового використання шрифту Брайля для читання текстів або знаків. [1] Щодо надання підтримки студентам з обмеженою рухливістю, акцент зміщується: хоча програмні рішення на основі доповненої реальності тут не відіграють такої домінуючої ролі, як апаратні компоненти, їхній внесок у забезпечення мобільності значний і не повинен ігноруватися. На особливу згадку заслуговує програма MapAbility, орієнтована на орієнтацію та логістичне планування. Ця програма спрощує пошук маршрутів, що підходять для користувачів інвалідних візків, а також аналіз наявності будівельних бар'єрів. Основною функцією програми MapAbility є проведення поглибленого дослідження загального стану доступності навчальних закладів у Європі, що дозволяє студентам з обмеженою рухливістю заздалегідь скласти уявлення про зручність навчального простору та вибрати університети, що відповідають їх інфраструктурним потребам.

Впровадження доповненої реальності в освіту - це не просто ще одна актуальна технологія, що пробуджує цікавість. Це реальний

інструмент, який відкриває доступ до знань всім людям. Найдивовижніше в доповненій реальності — це можливість побачити складні та абстрактні речі на власні очі: закони фізики, хімічні реакції, що завгодно. І все це — лише на екрані смартфона, що ідеально відповідає принципу BYOD (використовуй свій пристрій), додаючи велику інтерактивність та доступність до нових речей на уроках. Важливо також враховувати соціальний аспект, оскільки він також грає тут величезну роль. Технології доповненої реальності незамінні та важливі для інклюзивної освіти: вони допомагають учням з порушеннями зору чи слуху легше сприймати інформацію та почуватися впевненіше. Так, технологія все ще досить нова і перебуває на стадії розвитку, і є ще технічні складності — алгоритми, точність роботи, все це потрібно покращувати. Але потенціал доповненої реальності справді вражає: вона не просто поживляє підручники; вона створює нові можливості для всіх, робить навчання наочним та по-справжньому ефективним.

1.3 Програмні засоби створення програм доповненої реальності

Аналізуючи стан сучасних інструментів для розробки доповненої реальності (AR), можна побачити значну різноманітність програмних рішень, які можна класифікувати за платформою. Одним з перших є додаток Unity, що позиціонується як комплексне кросплатформове середовище розробки, що поєднує в собі функціональність потужного ігрового двигуна та інтегрований інструментарій для створення інтерактивного контенту. Головна особливість цієї програми - його універсальність: програмні програми, розроблені в Unity, можуть бути адаптовані та використані для широкого спектру обладнання - від персональних комп'ютерів та ігрових консолей до мобільних пристроїв та систем віртуальної (VR) та доповненої (AR) реальності. Архітектура движка забезпечує повноцінну роботу як із двовимірною, так і з тривимірною графікою, підтримуючи сучасні графічні API, такі як DirectX та OpenGL. При цьому саме середовище редактора доступне для

основних операційних систем (Windows, macOS, Linux), а компіляція готового проекту можлива для більш ніж 25 різних платформ. [8]

Варто також зазначити, що значна популярність програми Unity, особливо серед студентів та незалежних невеликих команд розробників, обумовлена не лише його технічними характеристиками, а й досить низьким порогом входження. Середовище програмування використовує мову програмування C#, яка є основним інструментом для написання скриптів, що робить процес розробки логічним та структурованим. Крім того, Unity містить великий вибір цифрових ресурсів (Asset Store), що дає змогу значно заощадити час на створенні прототипів, зосередившись на логіці програми, а не на розробці кожної текстури чи 3D-моделі з нуля. У контексті освітніх проектів важливо також те, що Unity все більше виходить за межі ігрової індустрії, стаючи еталоном для створення освітніх симуляцій, архітектурних візуалізацій та інтерактивних інструкцій.

Також варто звернути увагу на застосунок Unreal Engine 5, який також привертає багато уваги розробників. У ньому розробка додатків доповненої реальності у віртуальному середовищі значно оптимізована завдяки використанню спеціалізованого пакету Handheld AR Template, що є готовою технологічною базою з добре налагодженою логікою сканування навколишнього середовища та взаємодії з віртуальними об'єктами. [9]

Робота цього інструменту заснована на чітко визначеному сценарії користувача, де після надання дозволів на використання камери система самостійно запускає процедуру сканування просторового вигляду для пошуку площин, в той час як управління рухом при виконанні проекту здійснюється за допомогою кінцевого автомата, а взаємодія з користувачем реалізується за допомогою сенсорних рухів і інтерфейсу. З технічної точки зору, основним компонентом структури є тип BP_ARPawn, який відповідає за ініціалізацію та оновлення

віртуального середовища, обробку вхідних даних та зміни між фазами, а тип BP_ARGameMode гарантує запуск гри та налаштування візуального оформлення, що в сукупності дозволяє творцям обійтися без створення основного функціоналу спеціальним матеріалом. [9]

На основі проаналізованої інформації можна зробити порівняльну таблицю застосунків:

Інструмент	Тип платформи	Мова / Скриптинг	Основна перевага	Рівень входження (для навчання)
Unity	Кросплатформний рушій	C#	Asset Store (готові моделі); підтримка 25+ платформ; логічна структура.	Середній (за рахунок візуального редактора)
Unreal Engine 5	Кросплатформний рушій	Blueprints / C++	Готові шаблони (Handheld AR Template); автоматичне сканування площин.	Високий (професійний інструментарій)

Таблиця 1. Порівняльна характеристика інструментів розробки AR

Підсумовуючи всю інформацію, якщо говорити про серйозну розробку, Unity виглядає найкращим вибором. Завдяки кросплатформності та використанню зрозумілої мови C#, цей двигун дозволяє створювати високоякісні проекти навіть з невеликим досвідом програмування. Наявність величезної бази готових рішень для розробки в Asset Store економить багато часу розробнику на створенні моделей або текстур, що дозволяє більше зосередитися на логіці самої програми. Unreal Engine, хоч і є просунутим двигуном, пред'являє безліч вимог, які не підходять для всіх розробників, тому Unity часто допомагає студентам і тим, хто створює освітні симуляції. Він універсальний, не лякає новачків, і розпочати розробку тут справді простіше.

РОЗДІЛ 2. Моделювання програмних модулів навчального призначення для мобільних пристроїв за технологією доповненої реальності

2.1. Використання AR технологій у навчальному процесі

Цифровізація сучасного суспільства у сьогоднішньому технологічному світі змінює все настільки швидко, що освіта просто не встигає відставати. Більшість шкіл та вищих навчальних закладів прагнуть покращити вплив цифрових технологій. Швидкі темпи розвитку інформаційних технологій лише прискорюють усі процеси у суспільстві. Віртуальне середовище зі своїми спеціальними інструментами є реальним носієм величезних обсягів даних. Враховуючи це, Європейська комісія вирішила створити промислову коаліцію у сфері VR/AR. Технології доповненої реальності відкривають нові можливості для взаємодії з аудиторією — не лише в освіті, а й у культурі та медицині. З економічного погляду аналітики PwC підраховали: до 2030 року доповнена та віртуальна реальність принесуть світовій економіці приблизно 1,3 трильйона доларів. Більше того, прогнозується, що AR забезпечить більше зростання ВВП, ніж VR. Це ще один доказ того, як ці технології створюють нові робочі місця в усьому світі. Сучасні студенти давно формуються не лише в аудиторіях, а й у віртуальних просторах. Вони висувають нові вимоги. І нам потрібно шукати нових форматів навчання. [10]

Використання доповненої реальності (AR) у проектній діяльності для надання студентам чогось нового вражає. Студенти самі шукають та аналізують інформацію про об'єкти та працюють практично як справжні дослідники завдяки своєму інтересу до роботи. Розглядаючи приклад програми «Chornobyl NPP ARCH AR», що використовується на уроках фізики в контексті ядерної енергетики, стає незамінним. Воно дозволяє як зрозуміти принципи роботи реактора, і оцінити різні методи захисту від радіації. [10] Учні не вчать напам'ять сухі факти — вони справді

розуміють і переваги, і ризики цієї галузі, бачать її з різних боків, і це справді формує ціннісний підхід до навчання.

Концептуальна модель використання доповненої реальності в освіті заснована на чотирьох основних компонентах: техніко-технологічному, освітньо-науковому, формуючому та розвиваючому, а також якості навчання. Впровадження доповненої реальності базується на чітких принципах – доцільність, доступність, мобільність, освітня спрямованість. Але важливо не зводити доповнену реальність лише до «картинок на телефоні». Тут все набагато ширше. Існує безконтактна, універсальна доповнена дійсність. Є варіант з GPS, коли розташування визначає, що побачить користувач. Є проєкційна доповнена реальність — голограми, які буквально постають перед очима, а також контурна, яка працює з контурами реальних об'єктів. [11]

Іммерсивні технології справді краще і помітно змінюють підхід до навчання. Вони створюють особливе навчальне середовище, що дозволяє повністю поринути у вивчення предмета, що стає основою всього процесу. Доповнена та віртуальна реальність дають студентам не просто інформацію – вони дозволяють їм досліджувати її, відчувати кожен момент, і це зовсім інший рівень залучення. Дослідники наочно показують: якщо класичні методи навчання допомагають запам'ятати лише 5-10% матеріалу, завдяки віртуальному середовищі цей показник зростає до 75%. Це справжнє мультисенсорне навчання, що залишає яскраві емоції та сильні спогади. [12] Використання доповненої реальності (AR) у розвиток емоційного інтелекту слід чітко розділити по віковим групам. Для учнів початкової школи найкраще підходять AR-книги та інтерактивні картки. Вони знайомлять дітей із емоційними виразами обличчя, вчать розрізняти основні почуття персонажів, що є простим поєднанням навчання та AR. Старшим учням надаються можливості для відпрацювання навичок вирішення конфліктів та навчання контролю емоцій у складних ситуаціях. Але для старшої школи

найефективніші VR-кейси. Вони імітують реальні життєві сценарії: переговори, громадські виступи, кризи. Це зміцнює стресостійкість та допомагає розвивати лідерські якості. Іммерсивні технології відкривають місце для безпечних експериментів. Учень може постійно відтворювати складні поведінкові сценарії, аналізувати власні реакції та спостерігати за різними можливими реальними наслідками — і все це без страху засудження чи будь-якої шкоди для себе. [12] Використання доповненої реальності як допомагає розвивати емпатію, а й дає можливість відчувати себе «на місці іншої людини». Крім того, вона дозволяє, наприклад, тренувати біологічний зворотний зв'язок, виконуючи дихальні вправи у віртуальному просторі зниження рівня стресу. [12]

Для того щоб такі інструменти дійсно працювали, необхідна концептуальна модель впровадження, яка поєднує технічні та технологічні, освітні та наукові, а також компоненти, що формують та розвивають.

2.1.1 Переваги і недоліки AR технологій у освіті

Коли ми говоримо про інновації в сучасній освіті, не слід все зводити до покупки ноутбуків або планшетів. Йдеться про повну перебудову підходів — і це вже не просто інструменти, а методологія, яка базується на конструктивізмі та компетентнісному підході. Простіше кажучи, завдання полягає не в тому, щоб змушувати нас, студентів та школярів, пасивно слухати лекції годинами, а залучати нас до активного навчання через практику. Це дійсно змінює систему: цифрові інструменти стають органічною частиною процесу творення. Але не все так просто. На практиці цей шлях складається з кількох складних етапів: необхідно проаналізувати аудиторію, забезпечити технічну базу, розробити сценарії уроків, а потім постійно перевіряти, чи ці інновації дійсно працюють. І кожен із цих етапів має свої складнощі. Якщо проаналізувати конкретні переваги та недоліки, то одним із ключових напрямків є адаптивне та персоналізоване навчання. Його величезна перевага полягає в тому, що

вона дозволяє аналізувати освітні дані для прийняття рішень та будувати індивідуальні траєкторії для кожного. [13] Ми отримуємо швидкий зворотний зв'язок, темп і рівень складності коригуються відповідно до наших можливостей, що справді підвищує ефективність. Але є серйозні ризики: ми стаємо дуже залежними від технічної інфраструктури, і без системного підходу освітній процес може стати фрагментованим. Крім того, питання захисту наших персональних даних на цих платформах завжди залишається актуальним.

AR та VR – це зовсім інший рівень, не просто технології, а новий досвід. Тут можна по-справжньому зануритися в процес навчання, побачити те, що раніше існувало лише в уяві, або сміливо спробувати ризиковані ситуації, нічого не боячись. Але саме тут виникають проблеми. Перше, що зупиняє, – це висока вартість VR-гарнітур. Навіть якщо обладнання десь є, не так просто розібратися, як його налаштувати, особливо якщо в школі чи університеті немає необхідних спеціалістів. Але завдяки AR-технологіям ця проблема зникає: учню потрібен лише гаджет (смартфон, планшет), що відкриває більше можливостей для використання AR у навчанні. Ще одна болюча тема – критично мала кількість якісного освітнього контенту українською мовою. Це гальмує розвиток. Зрештою, який сенс у технологіях, якщо рідною мовою майже нічого викладати? Саме тому AR/VR досі є рідкістю в наших навчальних закладах.

Все зводиться до того, як грамотно поєднувати інновації з педагогічною доцільністю - саме від цього залежить успіх запровадження доповненої реальності в освіту. Так створюється простір, де кожен учень може рухатися своєю власною освітньою траєкторією. Доповнена реальність все ще набирає обертів, але ми вже бачимо, як вона відкриває шлях до інтерактивного, орієнтованого на особистість навчання, яке справді готує дітей до життя в цифрову епоху.

2.2. Технологія Unity3D

2.2.1. Основні поняття рушія

Для ефективної реалізації візуалізації фізичних процесів необхідно розуміти не тільки фізику, а й структуру середовища розробки. У випадку Unity3D все орієнтоване на компонентно-орієнтовану архітектуру. Це зовсім відрізняється від класичного об'єктно-орієнтованого програмування з його багаторівневим наслідуванням. Як йдеться у технічній документації Unity Technologies [14], тут усе будується з окремих компонентів. Таким чином, ви можете проектувати складні інтерактивні об'єкти, не ув'язуючи у величезних ієрархіях. Це відкриває двері для гнучкого моделювання фізичних експериментів, особливо коли потрібно змінювати або додавати функціональність на льоту. Unity базовим контейнером для всього контенту є сцена. Якщо говорити про освітній додаток, сцена фактично виступає як окремий модуль або рівень, присвячений конкретній лабораторній роботі. Unity дозволяє завантажувати сцени повністю або додавати їх частинами. Ця можливість стає критично важливою, коли необхідно заощаджувати оперативну пам'ять на мобільному пристрої. [15]. У центрі кожної сцени знаходиться ігровий об'єкт - той же GameObject. Він сам по собі порожній, не має функцій і зовнішнього вигляду. Як наголошується в офіційному посібнику користувача [16], це просто контейнер для компонентів. Компоненти це те, що наділяє об'єкт реальними властивостями. Це дозволяє розробнику змінювати об'єкт безпосередньо під час виконання програми: додавати чи видаляти фізичні характеристики залежно від цього, що відбувається у віртуальному експерименті.

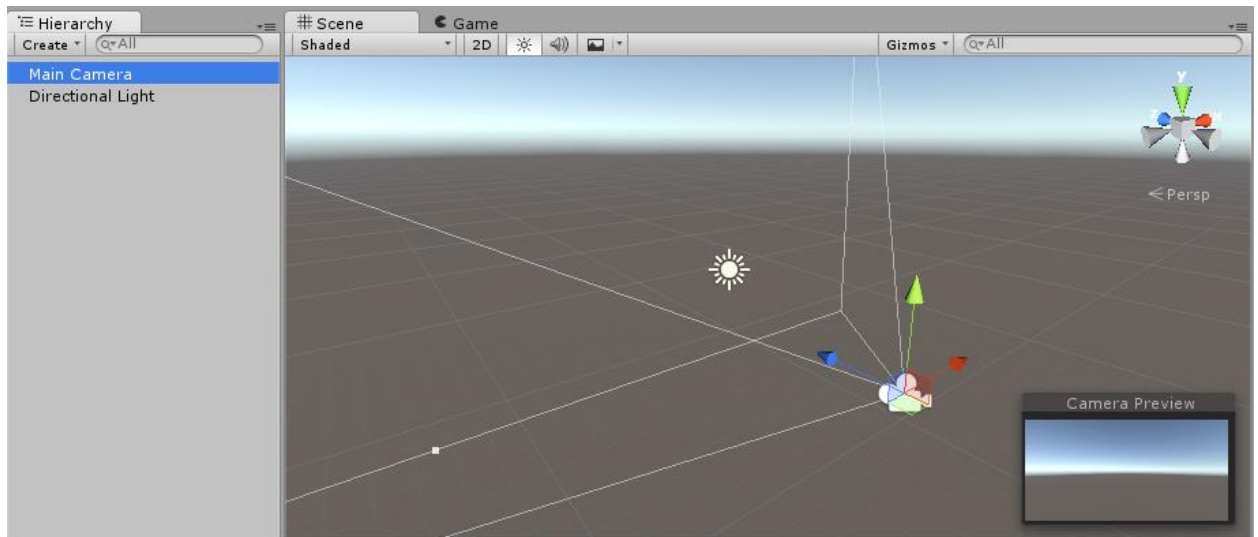


Рисунок 2.1 – Інтерфейс робочого середовища Unity3D: вікно ієрархії (Hierarchy) та вигляд сцени (Scene View)

Функціональність об'єкта залежить від цього, які компоненти до нього прикріплені. У додатках доповненої реальності ключову роль відіграє функція Transform: вона працює з координатами у світовому просторі, які система AR Foundation постійно синхронізує зі свідченнями гіроскопа та акселерометра мобільного пристрою. Unity використовує кватерніони для обертання об'єктів, що усуває проблему "блокування кардана" (Gimbal Lock), що часто виникає при роботі з кутами Ейлера при складних обертаннях. [17]. Щоб уникнути витрачання часу на копіювання схожих предметів лабораторного обладнання, у Unity використовуються префаби. У документації чітко пояснюється: префаб - це попередньо налаштований шаблон ігрового об'єкта, що зберігається у проекті як окремий ресурс. [18]. Префаби дозволяють динамічно створювати об'єкти в міру виконання лабораторної роботи без необхідності вручну

дублювати їх під час розробки. В результаті вихідний файл програми стає меншим, і вносити зміни стає простіше.

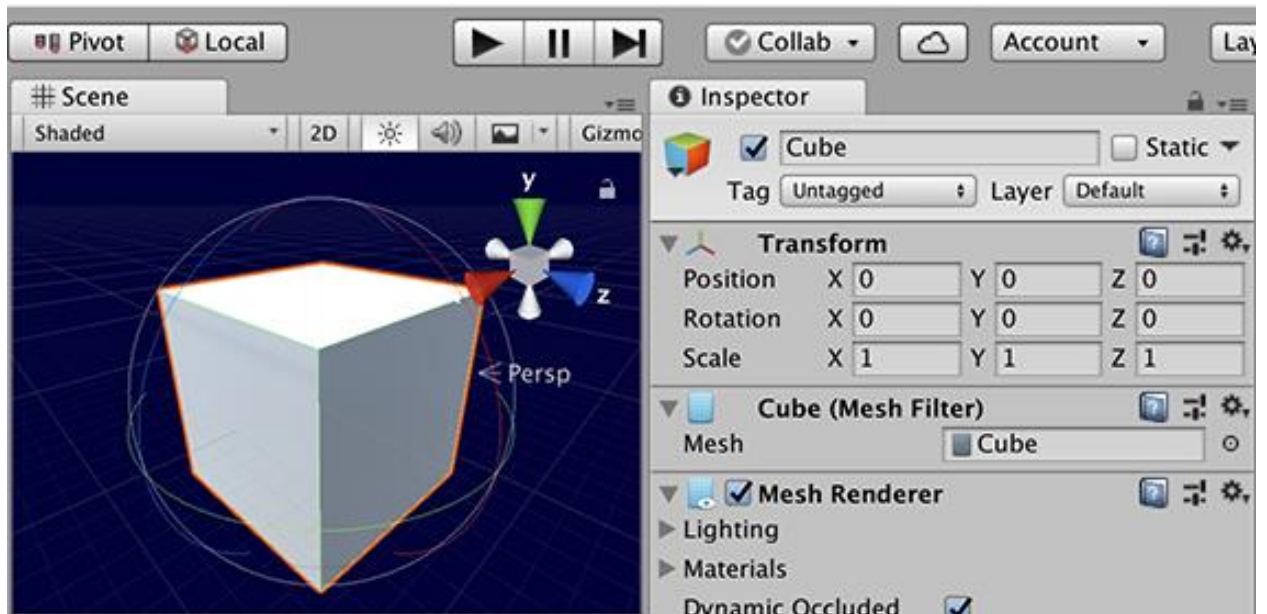


Рисунок 2.2 – Властивості компонента Transform та візуалізація геометричного примітива

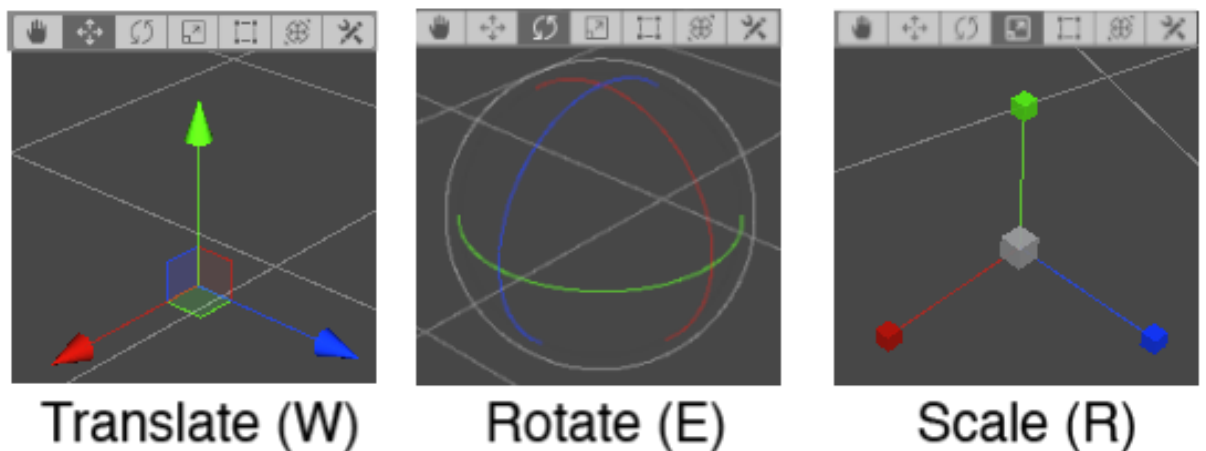


Рисунок 2.3 – Режими редагування параметрів компонента Transform у вікні сцени

Логіка взаємодії об'єктів та математична модель фізичних явищ реалізовані за допомогою скриптів на C#, похідних від базового класу MonoBehaviour. Життєвий цикл скриптів чітко регулюється двигуном, і розробки фізичних симуляцій слід приділяти особливу увагу методам відновлення стану об'єктів. Метод Update викликається перед рендерингом кожного кадру і використовується в основному для обробки введення користувача. Натомість для обчислень, пов'язаних із фізикою,

використовується метод `FixedUpdate`, який викликається через фіксований інтервал часу. Згідно з рекомендаціями NVIDIA PhysX [19], саме цим методом слід виконувати всі обчислення сил та швидкостей, оскільки він забезпечує детермінованість моделювання незалежно від частоти кадрів на пристрої користувача. Таким чином, архітектура Unity надає необхідні інструменти для створення точних та оптимізованих моделей фізичних явищ, що є необхідною умовою високоякісного освітнього продукту.

2.2.2. Порівняльний аналіз Unity з альтернативними середовищами

Сьогодні ігрові рушії - це серце будь-якого проекту в промисловості. Вони беруть на себе весь технічний бік питання. У порівнянні з універсальними середовищами розробки, тут все простіше: двигуни вже містять найнеобхідніші інструменти та плагіни. Розробникам не потрібно витрачати енергію на елементарні речі — вони одразу працюють із готовими модулями для рендерингу, фізики, звуку, штучного інтелекту та мережевої взаємодії. Це економить час та нерви. А коли команда використовує один і той же двигун для цілого ряду додатків, це значно заощаджує гроші та зусилля. [21]

Однією з ключових переваг альтернативних середовищ розробки є кросплатформність. Розробники можуть одночасно випускати свої продукти для Windows, Linux та мобільних пристроїв. Сучасні системи не можуть обійтися без апаратного прискорення: вони максимально використовують можливості графічних процесорів для розвантаження центрального процесора під час роботи зі складною графікою та анімацією. Візьмемо, наприклад, WPF. Тут багато процесів, як-от управління анімацією або створення візуальних ефектів, вже автоматизовані — це значно спрощує життя програмістам. [21]

Якщо порівнювати ці платформи, Unreal Engine одразу привертає увагу своїм класичним об'єктно-орієнтованим підходом на основі C++. Тут все ясно: кожен елемент — це об'єкт, а ієрархія класів продумана до

дрібниць. Найбільша перевага Unreal Engine – велика кількість вбудованих інструментів. Розробник може створювати складну ігрову логіку прямо з коробки, не вдаючись до сторонніх плагінів. Unity 3D – це зовсім інша історія. Вона дуже популярна серед інді-розробників і досі займає позицію найзатребуванішого середовища для створення ігор. Тут часто доводиться підключати додаткові розширення, якщо потрібна повна функціональність. Але це не відлякує – навпаки, Unity приваблює гнучким інтерфейсом, підтримкою C#, інтеграцією з Mono та можливістю роботи з величезною кількістю форматів файлів та бібліотек [21]. Варто приділити увагу тому що, Unity підтримує кращу оптимізацію для настільних програм, що дозволяє проектам працювати на мобільних пристроях. У зв'язку з цим середня частина Unity може бути оптимізована не для найскладніших завдань розробки. Unity позбавляється своїх найбільш рекомендованих та практичних рішень. [20]

Що стосується візуалізації та налагодження, у кожного двигуна є свої інструменти. У Unreal Engine це Visual Logger – він дозволяє відстежувати усі спостереження у часі. Unity, з іншого боку, дозволяє працювати з Ray Cast Gizmos та Heuristic Mode для ручного тестування реакції агентів. Вибір між цими платформами справді залежить від цілей проекту. Unity залишається найкращим вибором для досліджень та прототипування завдяки своїй доступності, в той час як Unreal Engine 5 стає фаворитом для створення NPC та симуляцій у проектах, де реалістична графіка та швидкість ітерацій навчання мають вирішальне значення. [22]

Критерій порівняння	Unity	Unreal Engine (UE4/UE5)
Основна мова програмування	C#, UnityScript	C++
Візуальне програмування	Підтримує (Visual Code)	Blueprints (система блупринтів)

Критерій порівняння	Unity	Unreal Engine (UE4/UE5)
Поріг входження	Нижчий; мова C# легша для вивчення	Вищий; потребує знання C++ та складної структури рушія
Графічні можливості	Технологія Nano Tech для високої деталізації	Лідер завдяки технологіям NANITE (рендеринг) та Lumen (освітлення)
Спеціалізація за типом ігор	Кращий вибір для 2D та інді-проектів	Оптимальний для AAA-ігор та складних 3D-проектів
Оптимізація ресурсів	Економніший при використанні низькодеталізованих асетів	Краща оптимізація при рендерингу високодеталізованих середовищ
Плагіни та інструменти	Величезний вибір у магазині асетів (Unity Asset Store)	Багато потужних нативних (вбудованих) інструментів
Навчання з підкріпленням (RL)	ML-Agents Toolkit (існує з 2017 року)	Learning Agents (новий плагін з версії 5.3)
Швидкість навчання III	Повільніше (до 5-6 днів для складних тренувань)	Значно швидше (близько 2 годин для аналогічних завдань)
Документація та спільнота	Дуже великий обсяг матеріалів та активна спільнота	Документація для нових інструментів (як Learning Agents) ще наповнюється
Кросплатформеність	Підтримує Windows, Linux, iOS, Android, консолі	Підтримує Windows, Linux, PlayStation, Nintendo Switch тощо

Таблиця 2. Порівняльна характеристика середовищ розробки

2.2.3. Особливості реалізації AR-застосунків

Розробка додатків доповненої реальності (AR) має свою специфіку та суттєво відрізняється від звичайного створення мобільного програмного забезпечення. Головне тут – постійна синхронізація цифрових об'єктів із реальним світом у момент їх використання. Все ґрунтується на алгоритмі SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). Саме він допомагає пристрою не тільки «бачити» навколишній простір, але й точно визначати своє місцезнаходження на цій карті [23]. Це створює серйозне навантаження на процесор, оскільки система повинна обробляти потік даних з камер та інерційних датчиків практично без затримок – інакше користувач відразу помітить, що щось не так. Навіть невелика помилка у відстеженні призводить до того, що моделі зміщуються по екрану. В результаті ілюзія руйнується, і ефект занурення губиться. Це одна із найбільших проблем, з якими стикаються розробники доповненої реальності. [23, 25].

Одна з головних складнощів при впровадженні — адаптація до різних апаратних середовищ. Сучасні розробники часто використовують кросплатформні інструменти, такі як AR Foundation у Unity. Це дозволяє працювати з різними API – ARKit для iOS та ARCore для Android – через єдиний інтерфейс. [25]. Однак, програмна уніфікація не усуває апаратні обмеження. Постійно увімкнена камера, складні математичні обчислення, 3D-рендеринг — все це швидко нагріває мобільний пристрій і буквально розряджає батарею за лічені хвилини. [26]. Тому оптимізація – це не просто додатковий бонус, а суворя потреба. Необхідно максимально стискати текстури, використовувати максимально прості шейдери, щоб не перевантажувати графічний процесор. [23, 27].

У дизайні інтерактивних інтерфейсів у середовищах доповненої реальності відбувається відхід від традиційних підходів до користувальницького інтерфейсу та досвіду користувача. Замість звичайних плоских кнопок на екрані розробники створюють просторові

інтерфейси, що враховують глибину сцени та переміщення користувача у тривимірному просторі. [24]. Справжня проблема — це оклюзія: коли віртуальний об'єкт може бути за реальним об'єктом, наприклад, коли персонаж «ховається» за диваном. Якщо оклюзія працює некоректно та семантичний аналіз сцени не розпізнає підлогу, стіни чи меблі, доповнена реальність виглядає неприродно. Все руйнується: фізика світла, просторові взаємодії — і користувач одразу бачить, що щось не так. [25, 26].

Розробка проектів доповненої реальності у 2026 році ставить перед розробниками безліч завдань, головне з яких — середовище, в якому працюватиме програма. У звичайних додатків таких проблем практично немає, але стабільність доповненої реальності значною мірою залежить від освітлення, структури поверхні та навіть відсутності дзеркал, які вводять в оману датчики глибини та камери. [23]. Тому тестування перетворюється на справжній марафон: доводиться знову та знову перевіряти алгоритми, щоб вони без збоїв розпізнавали площини та маркери як у темній кімнаті, так і під сліпучим сонцем. [27]. В результаті, створення дійсно високоякісної програми доповненої реальності завжди зводиться до пошуку балансу між точністю комп'ютерного зору та технічними обмеженнями мобільних пристроїв.

Суть проста: запуск AR-додатку у 2026 році — це не просто черговий проект із програмування. Це справжній виклик. Розробнику потрібно як писати код, а й вміло інтегрувати складні алгоритми комп'ютерного зору, такі як SLAM, враховуючи у своїй обмежені ресурси сучасних мобільних пристроїв [23, 25]. Традиційні плоскі інтерфейси більше не працюють - тепер важливі просте взаємодія у просторі, реалістичне затінення, адаптація до освітлення. Все це створює відчуття глибокого занурення. Але це також спричиняє сувору необхідність оптимізації та ретельного тестування безпосередньо на реальних пристроях. [24, 26]. Зрештою, по-справжньому високоякісний продукт

доповненої реальності — це баланс: він має поєднувати високу візуальну точність, стабільне просторове відстеження та технічні обмеження мобільних платформ [27]. Це не просто технологія, а ціле мистецтво.

2.3. Моделювання мультимедійних 3D об'єктів навчального призначення з використанням технологій доповненої реальності

Створення тривимірних об'єктів для освітніх проєктів починається з простого розуміння: будь-яка модель у віртуальному просторі — це математика, опис поверхні об'єкта мовою чисел. 3D-моделювання – це живий процес. Тут ми формуємо об'єм, переміщуємо вершини, з'єднуємо ребра, працюємо з гранями у нашому уявному тривимірному просторі. Особливо в освіті, коли необхідно пояснити складні фізичні явища, такі моделі стають мостом між сухою формулою з підручника та реальним світом, який можна зрозуміти та відчувати. Додайте доповнену реальність – і все змінюється. Тепер учень не просто дивиться на креслення маятника чи пружини. Він взаємодіє з ними, змінює параметри, бачить, як це працює — за своїм столом, тут і зараз. Серед професійних інструментів не можна не згадати Autodesk Maya – це еталонний гігант у світі 3D-моделювання. Програма давно стала стандартом для кіноіндустрії та складних візуальних ефектів. Maya пропонує неймовірно повний набір інструментів полігонального моделювання, що дозволяють створювати об'єкти будь-якої складності - від простих геометричних тіл до деталізованих органічних структур. [29]. Сильна сторона Maya – це система анімації та деформації. Він створює руїни механізмів максимально реалістично. Однак є і недолік: програма дорога, а інтерфейс не дуже зручний у використанні, що часто створює проблеми тим, хто працює над невеликими чи початковими проєктами.

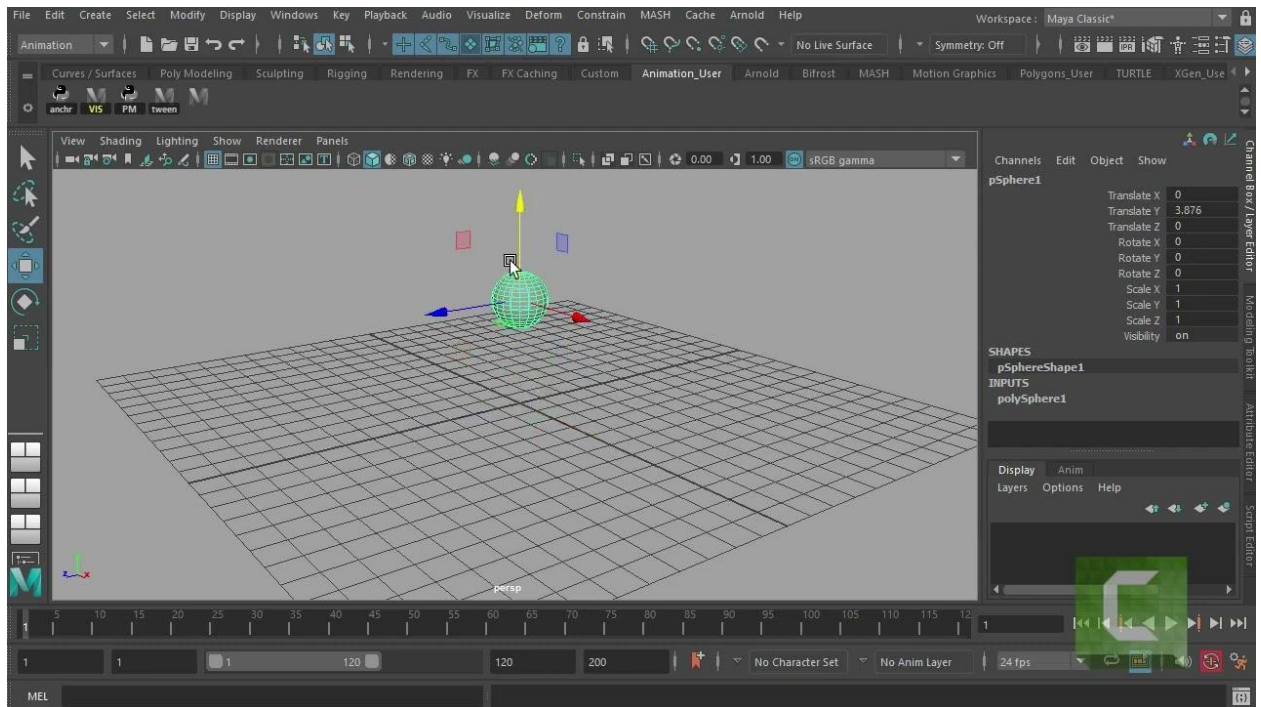


Рисунок 2.3 – Інтерфейс робочого середовища Autodesk Maya

Ще одним фундаментальним продуктом у світі 3D-графіки є 3ds Max, традиційно популярний серед архітекторів та інженерів. Офіційні джерела наголошують, що це програмне забезпечення відрізняється своєю логікою роботи, побудованою на системі модифікаторів, яка дозволяє неруйнівним способом змінювати параметри об'єкта на будь-якому етапі розробки. [30]. Це надзвичайно зручно для створення точних технічних моделей, де необхідно суворо дотримуватись пропорцій та розмірів, що важливо для візуалізації лабораторного обладнання. Однак, як і Maya, 3ds Max більше орієнтований на великий корпоративний сектор та професійну візуалізацію.

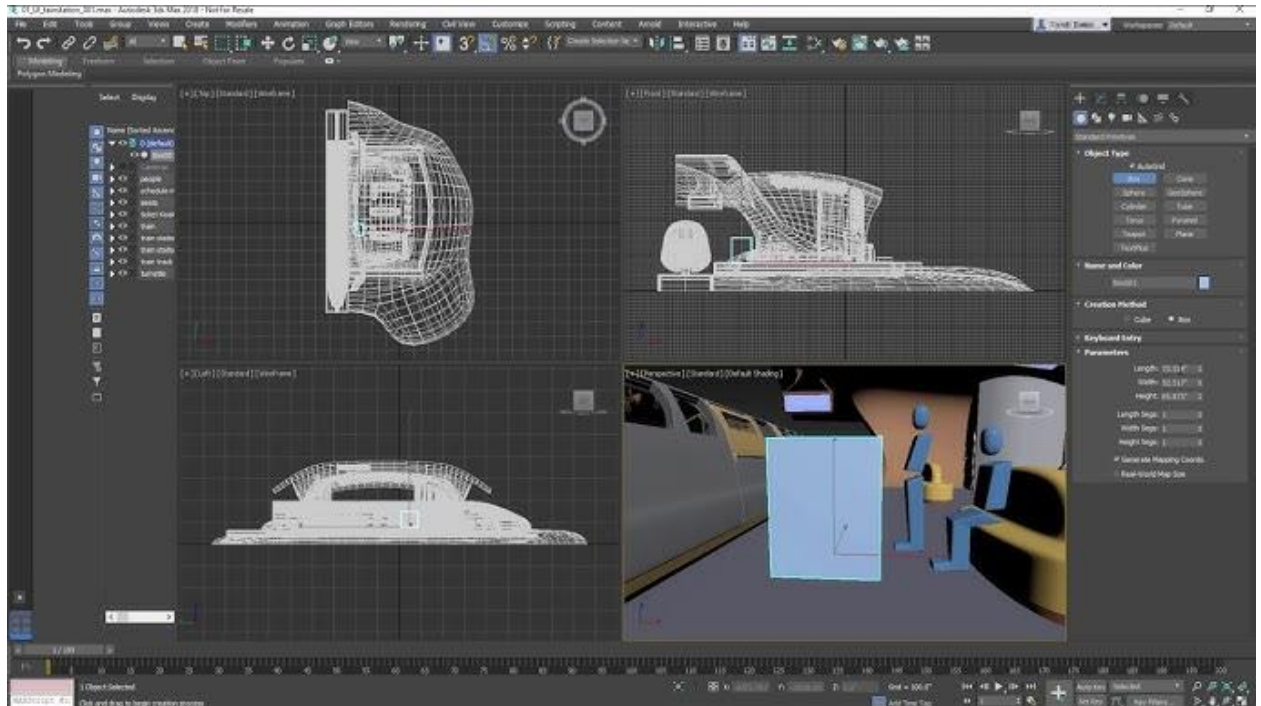


Рисунок 2.4 – Інтерфейс робочого середовища 3ds Max

У цьому контексті Blender виглядає найоптимальнішим і найпрогресивнішим рішенням, особливо для розробки дипломного проекту з використанням доповненої реальності. Blender поєднує можливості моделювання, текстурювання та анімації в одному безкоштовному пакеті з відкритим вихідним кодом. Як зазначається в офіційному посібнику користувача, архітектура Blender заснована на роботі із сітчастими об'єктами, де користувач має повний контроль над кожною вершиною та полігоном, що має вирішальне значення для створення оптимізованих моделей [28]. Blender - найбільш зручний спосіб підготовки контенту для Unity, оскільки дозволяє легко створювати низькополігональні версії моделей, які швидко працюватимуть на смартфонах в режимі доповненої реальності. Ви можете бути впевнені, що створена модель пружинного маятника буде виглядати реалістично завдяки PBR-шейдерам, які Blender розраховує за тими самими алгоритмами, що й дорогі платні аналоги, забезпечуючи безперебійну передачу даних через формат FBX.

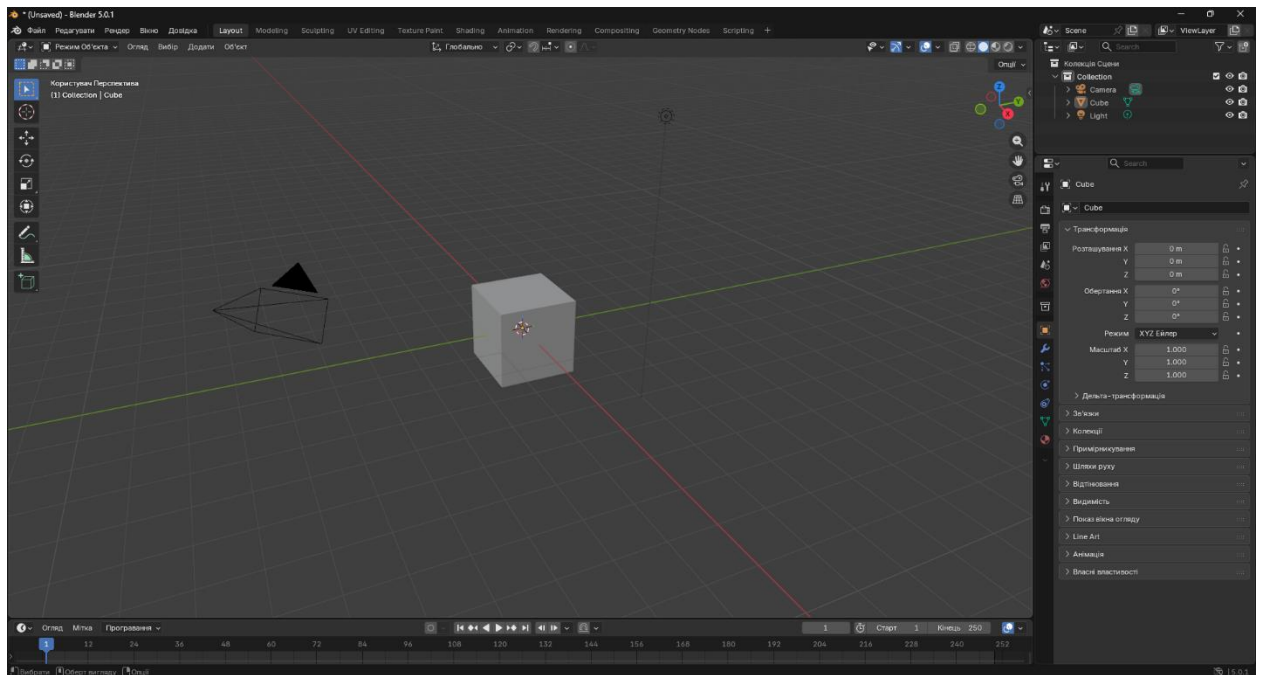


Рисунок 2.3 – Інтерфейс робочого середовища Blender

2.3.1. Порівняльний аналіз Blender з Maya і 3ds Max

Сьогодні вибір правильного програмного забезпечення для 3D-моделювання та анімації є нагальним питанням для всіх, хто працює в цій галузі. Зараз на ринку є вибір між трьома застосунками. На перший погляд здається, що Maya та 3ds Max контролюють ринок, але насправді Blender стрімко набирає популярності. Недавні дослідження доводять, що Blender — це не просто безкоштовна заміна комерційних продуктів, а повноцінний конкурент, часто перевершуючи їх у зручності використання та швидкості. Дивлячись на процес рендерингу, різниця помітна одразу. Blender з движком Eevee обробляє кадри всього за кілька секунд, тоді як Maya від Arnold може зайняти набагато більше часу. [31]. Для розробників це дуже зручно бо можна працювати швидко та ітеративно, створювати анімації без доступу до дорогих серверних станцій. Blender не вибагливий до обладнання, він стабільно працює навіть на звичайних комп'ютерах. [31].

При порівнянні Blender з 3ds Max, останній все ж таки вважається потужним інструментом для професіоналів, але аналіз відповідно до міжнародного стандарту якості програмного забезпечення ISO 9126

вказує на перевагу Blender у категоріях простоти використання та загальної ефективності. [32]. Користувачі часто відзначають, що інтерфейс Blender є більш зрозумілим для вивчення та щоденної експлуатації. Це підтверджується вищими балами за критеріями легкості навчання та операбельності [32]. Хоча 3ds Max залишається популярним завдяки спеціалізованим інструментам для моделювання складних сцен, Blender пропонує більш збалансований досвід, оскільки відкритий вихідний код і активна підтримка спільноти дозволяють йому швидше адаптуватися до потреб сучасних аніматорів. [32].

З точки зору якості кінцевого зображення, Maya все ще може запропонувати глибшу деталізацію текстур у складних реалістичних симуляціях, але для більшості анімаційних проектів можливостей Blender цілком достатньо і результати виглядають м'якими та естетично приємними. [31]. Цей підхід ще раз демонструє, наскільки потужним інструментом може бути Blender як центральний вузол для процесу анімації — легко отримати чіткий результат, не витрачаючи енергію і не турбуючись ні про що.

Якщо оцінювати програмне забезпечення за тим, що дійсно важливо для користувача, то Blender сьогодні є явним лідером. Це факт. Звичайно, 3ds Max та Maya мають свої сильні сторони в архітектурі чи великому кіно, але Blender виглядає найбільш збалансованим інструментом. Він дуже швидкий. Система миттєво реагує на кожну дію аніматора, і така плавність роботи справді підкуповує [32]. З огляду на його постійний розвиток, можна сміливо сказати, що для сучасного творця, який цінує свій час і зручність своїх інструментів, Blender є найвигіднішим вибором, що забезпечує професійні результати зі значно меншою кривою навчання та технічними витратами. [31, 32].

Ще одна цікава деталь – наскільки широкий набір інструментів Blender. Навіть незважаючи на те, що він безкоштовний, іноді пропонує більше можливостей, ніж Maya або 3ds Max, особливо коли йдеться про

моделювання. Саме тому його часто вибирають як основне робоче середовище. У ньому зручно будувати геометрію з нуля і збирати фінальну сцену. Програма підтримується, тому постійно виходять оновлення – анімації стають природнішими і більше нагадують фізичний світ. Якщо додати до цього високу швидкість рендерингу та простоту використання, стає очевидним що для власних проєктів чи невеликих студій Blender, найкращий варіант [31, 32]

Параметр	Blender	Autodesk Maya	3ds Max
Ліцензія та ціна	Безкоштовно (Open Source)	Платна підписка	Платна підписка
Рендеринг (швидкість)	Надшвидкий	Повільний	Середня швидкість
Якість текстур	М'яка, менш деталізована	Дуже висока/детальна	Висока/Професійна
Легкість навчання	Висока	Складна	Середня
Загальна якість ПЗ	Висока	Не вказано	Середня
Основна галузь	Універсал, Indie, Motion Design	Кіно, VFX, Анімація	Геймдев, Архітектура
Вимоги до ПК	Низькі (легка програма)	Високі (потребує GPU)	Високі (вимоглива до RAM)
Операційні системи	Win, Mac, Linux	Win, Mac, Linux	Тільки Windows

Таблиця 3. Порівняльна характеристика Blender, Autodesk Maya, 3ds Max

РОЗДІЛ 3. Проектування та розроблення 3D-об'єктів навчального призначення для мобільних пристроїв з використанням AR

3.1. Сценарії демонстрації фізичних процесів у комп'ютерних програмах навчального призначення

Розробляти сценарії для навчальних комп'ютерних програм — завдання не з простих, але саме воно визначає, як учень буде взаємодіяти з віртуальною моделлю і наскільки ефективно засвоїть матеріал. Особливо це помітно в розділі механіки. Тут сценарій — це не просто набір анімацій. Він створює справжній керований експеримент, де кожен параметр має чітке фізичне підґрунтя. Все зводиться до однієї мети: перенести абстрактні формули у світ реальних, візуальних образів. Це особливо важливо для учнів, коли вони знайомляться з гармонічними коливаннями. Сценарій — це ніби міст між теорією і практикою. Учень сам змінює умови, експериментує, бачить, як змінюється поведінка об'єктів просто на екрані. Такий підхід справді допомагає зрозуміти фізичні закони, а не просто завчити їх.

Один із варіантів сценарію демонструє математичний маятник і показує, як період коливань залежить від довжини підвісу та прискорення вільного падіння. У віртуальному середовищі на екрані — модель з невагомою, нерозтяжною ниткою і тягарцем на кінці. Учень одразу може змінити довжину нитки: подовжив — і бачить, що маятник рухається повільніше. Це відчутно навіть без складних обчислень. Ще один ключовий момент — візуалізація сил. Вектори показують силу тяжіння, що тягне тягарець вниз, і силу натягу нитки. Разом ці сили створюють попертальну силу, яка повертає маятник до рівноваги. Учень може відхилити тягарець на будь-який кут і спостерігати, як при малих кутах рух залишається гармонічним. Це гарно демонструє, де реально працюють теоретичні формули, і де вже варто шукати інші підходи.

Другим сценарієм виступає пружинний маятник, головний акцент — на тому, як жорсткість пружини взаємодіє з масою підвішеного вантажу. Тут користувач сам вирішує параметри: можна змінити

коефіцієнт пружності або підбирати вантажі різної ваги. Все це — не просто для галочки. Програма показує закон Гука в дії: чим більше розтягнути пружину, тим сильніше вона тягне назад. Під час руху маятника легко помітити моменти, коли пружина максимально стиснута чи розтягнута — саме тоді тіло зупиняється, а потенціальна енергія досягає піку. Якщо взяти важчий вантаж, осциляції стають повільнішими навіть при тій самій пружині. Це наочно дає зрозуміти, що таке інертність і чому вона важлива для коливальних рухів.

На фінальному етапі учень сам досліджує маятники: переставляє їх у кімнаті, порівнює, як вони працюють в однакових і різних умовах. Доповнена реальність тут — справжній прорив. Не треба турбуватись, що пружина розтягнеться або нитка перетреться, як це часто буває в шкільній лабораторії. У віртуальному середовищі все працює точно: сили, траєкторії — всі ці речі можна буквально побачити, навіть якщо вони зазвичай невидимі. Демонстрації в AR — це вже не просто ілюстрації з підручника. Це інструмент, який захоплює, дозволяє експериментувати, пробуджує справжню цікавість до механіки і робить навчання живим, динамічним, по-справжньому цікавим.

Коли поєднуються ці два види маятників в одному навчальному блоці, з'являється можливість дійсно порівняти, як виникають коливання. Учень отримує шанс одночасно запустити обидві моделі і наочно побачити, що спільного в гармонічних рухах: тут і циклічність, і перетворення енергії з кінетичної в потенціальну, і назад. Важливо ще й те, що під час експерименту учень фіксує моменти рівноваги — саме ті, коли сили зрівноважені, але тіло, завдяки інерції, все ще рухається. Такий формат навчання працює глибше: тут вже не просто читаєте про фізику процесу, а берете участь у дослідженні, самі керуєте параметрами, самостійно доходите до висновків. І те, що раніше було теорією у підручнику, стає реальним досвідом.

Ще один важливий момент у сценарії — пов'язати абстрактні моделі з реальними життєвими ситуаціями. Щоб підняти мотивацію учнів, варто додати елементи контекстного навчання. Той самий пружинний маятник — це вже не просто тягарець на пружині, а, скажімо, спрощена модель амортизатора автомобіля або віброізоляційної платформи. Учень не просто вивчає коливання, він вирішує конкретну інженерну задачу: які параметри обрати, щоб коливання швидше згасали або, навпаки, тривали довше. Такий підхід робить навчання практично корисним і наочно показує, де знання з механіки знадобляться у майбутній професії чи навіть у звичайному житті.

Також варто описати сценарій зворотного зв'язку — це важлива частина роботи програми під час експерименту. Коли вчитель не встигає стежити за кожним учнем, AR-додаток має самостійно допомагати: підказувати, акцентувати увагу, направляти. Скажімо, якщо учень занадто відхиляє математичний маятник — більше ніж на 15-20 градусів — програма одразу реагує. Вона може, наприклад, змінити колір траєкторії або показати коротке пояснення: за таких кутів рух маятника вже не гармонічний. Це не просто повідомлення — це навчання. Школяр засвоює, як проводити експеримент акуратно, а заразом бачить, де фізичні закони працюють, а де вже ні. Така система перетворює програму з простого інструмента на справжнього розумного помічника, який не просто перевіряє, а вчить і розвиває.

Сценарії перетворюють віртуальну модель із простої анімації на справжній науковий інструмент. Учень більше не просто спостерігає — він експериментує, змінює параметри маятників і одразу бачить, як це впливає на систему. Так він по-справжньому вчиться розуміти складні закони механіки. Доповнена реальність відкриває приховані деталі руху: вектори сил, траєкторії — все стає наочним і зрозумілим навіть на інтуїтивному рівні. Такий підхід ламає межу між механічним

зазубрюванням формул і глибоким розумінням фізики. Учні починають не просто запам'ятовувати — вони думають, аналізують, цікавляться.

3.2. Проектування 3D об'єктів доповненої реальності з вивчення фізичних законів у курсі фізики 10 клас

Процес реалізації практичної частини проекту розпочався з етапу тривимірного моделювання у середовищі Blender, де було створено візуальну основу для майбутньої AR-візуалізації математичного маятника. Оскільки додаток орієнтований на учнів 10-х класів, особлива увага приділялася геометричній точності та реалістичності пропорцій об'єктів: штатива, нитки та вантажу у формі кулі. Основним технічним викликом на цьому етапі було правильне налаштування точок прив'язки (Pivot Points), оскільки для коректної імітації фізичних коливань у Unity центр обертання кульки мав бути чітко скоординований із точкою підвісу на штативі. Окрім естетичного вигляду, було приділено увагу оптимізації полігональної сітки моделі, щоб забезпечити високу продуктивність застосунку на мобільних пристроях без втрати якості візуалізації. Завершальним кроком став експорт моделі у формат FBX із збереженням ієрархії об'єктів, що дозволило безперешкодно перенести геометрію в ігровий рушій Unity для подальшого налаштування фізичних властивостей та інтерфейсу користувача.

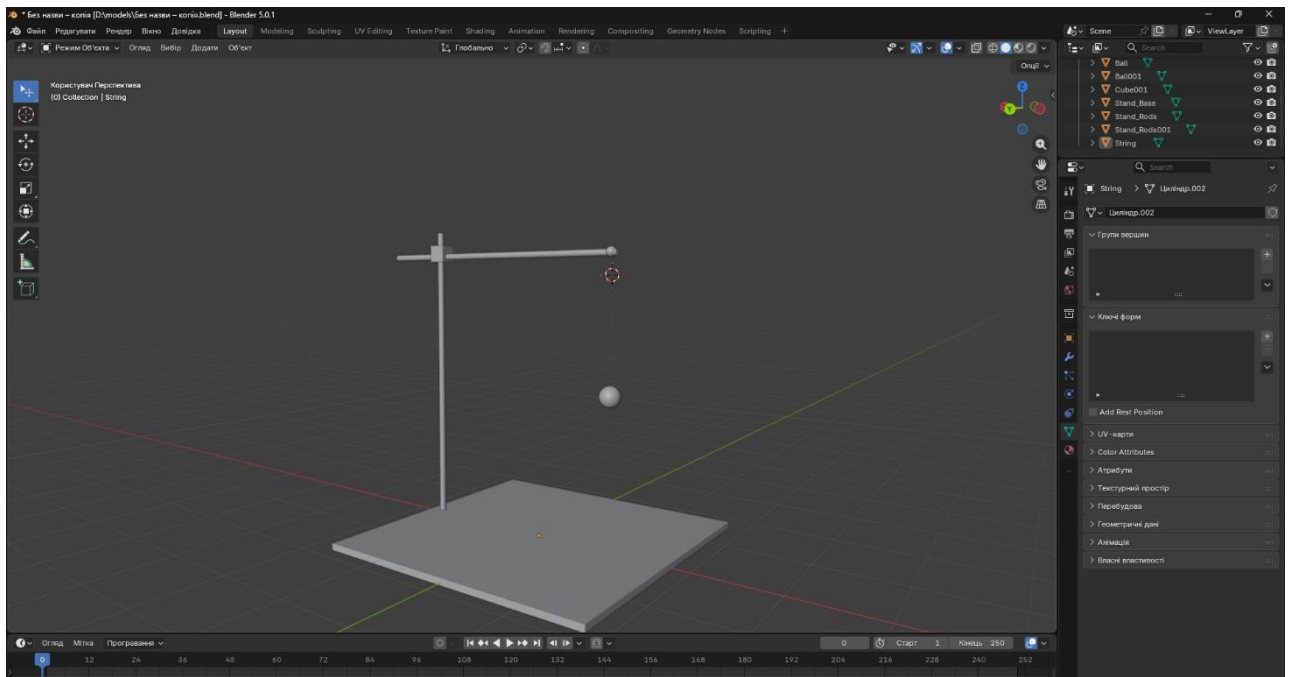


Рисунок 3.1 – Модель математичного маятника у Blender

Другою моделлю у проектуванні став пружинний маятник. Основним завданням було створення не просто статичного візуального образу, а інтерактивного інструменту, який би чітко демонстрував динаміку гармонічних коливань та дію сили пружності. На етапі концептуальної розробки об'єкт був розділений на три логічні компоненти: нерухому основу у вигляді штатива, деформаційну спіраль пружини та вантаж визначеної маси. Така ієрархічна структура дозволила реалізувати незалежну трансформацію кожного елемента, що є критично важливим для достовірної симуляції фізичних процесів. Особлива увага при проектуванні геометричної форми приділялася оптимізації об'єкта для роботи на мобільних пристроях, які є основними носіями технології доповненої реальності. Оскільки пружина має складну спіралеподібну форму з великою кількістю витків, було прийнято рішення використовувати низькополігональне моделювання з ретельним налаштуванням груп згладжування. Це дозволило зберегти візуальну округлість дроту при мінімальній кількості трикутників у сітці, забезпечуючи високу швидкість рендерингу в AR без втрати реалістичності. При розробці вантажу було закладено принцип візуальної

відповідності, де геометричний об'єм об'єкта підсвідомо асоціюється у користувача з його масою, що полегшує сприйняття теоретичного матеріалу про інертність тіл

Візуальне оформлення моделі базувалося на принципах фізичної достовірності матеріалів. Для штатива було обрано матові текстури, що не створюють зайвих відблисків у AR-просторі, тоді як пружина отримала матеріал із металевим блиском для акцентування уваги на її пружних властивостях. Важливим аспектом проектування стала робота з UV-розгорткою пружини: її було створено таким чином, щоб при вертикальному розтягуванні мешу текстура металу не деформувалася помітно для ока, зберігаючи цілісність візуального досвіду. Кольорова палітра вантажу була обрана контрастною до навколишнього середовища, що дозволяє учню чітко фіксувати положення рівноваги та амплітудні точки під час проведення віртуального досліду. Математичне обґрунтування геометрії було закладено безпосередньо в параметри моделі. Довжина пружини у стані спокою та її крок були вираховані так, щоб вони гармонійно поєднувалися з майбутніми розрахунками жорсткості. Проектування проводилося з урахуванням того, що кожен геометричний параметр об'єкта згодом буде напряду пов'язаний із фізичними величинами, такими як коефіцієнт жорсткості k та маса m . Це забезпечило базу для того, щоб у фінальному додатку період коливань, що розраховується за формулою $T = 2\pi\sqrt{m/k}$, повністю збігався з візуальною частотою руху розробленої 3D-моделі. Таким чином, спроектований об'єкт став повноцінним цифровим двійником реального лабораторного обладнання, адаптованим для специфічних умов доповненої реальності.

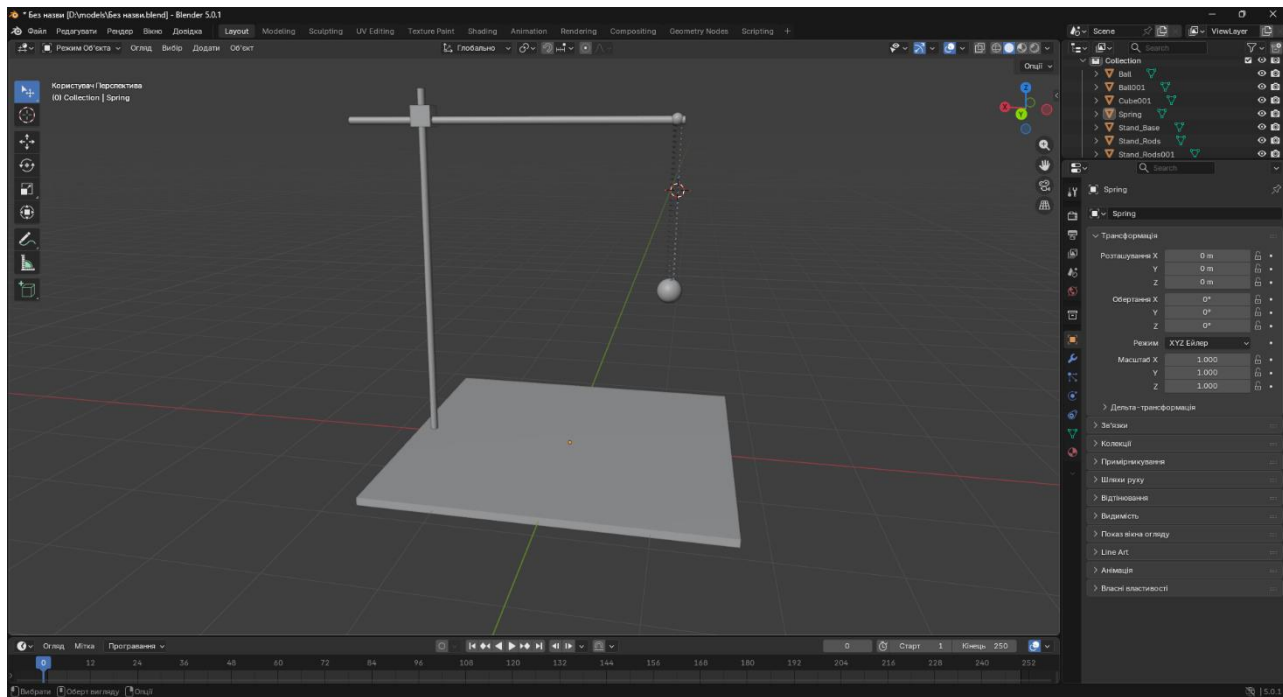


Рисунок 3.2 – Модель пружинного маятника у Blender

Останнім елементом у цій роботі було проектування похилої площини яку було реалізовано безпосередньо в середовищі розробки Unity, що дозволило досягти максимальної точності у взаємодії між геометричною формою та фізичними колайдерами. Використання вбудованих примітивів замість зовнішнього 3D-моделювання стало раціональним рішенням для створення об'єктів із чіткою топологією, оскільки це забезпечує ідеальну відповідність поверхонь під час симуляції тертя та ковзання. Основна конструкція була спроектована як цілісна ієрархічна система, де кореневий об'єкт із назвою `inclined_plane` виступає загальним контейнером для всіх функціональних частин, включаючи робочу поверхню, опору та досліджуваній вантаж.

Робоча поверхня площини була сконструйована на основі масштабованого куба, при цьому особлива увага приділялася налаштуванню локальних осей обертання, щоб зміна кута нахилу відбувалася природно відносно точки опору, не порушуючи візуального зв'язку зі штативом. Для забезпечення відтворюваності фізичних експериментів у проект було закладено спеціальний технологічний об'єкт `BlockStartPoint`, який фіксує точні координати появи вантажу на вершині

схилу. Сам вантаж у формі куба отримав компонент Rigidbody для реалізації законів динаміки, а його геометричні межі були точно підігнані під площину, щоб виключити будь-які артефакти при візуалізації доповненої реальності. Такий підхід до проектування дозволив створити стабільну модель, де кожен візуальний елемент має чітке фізичне обґрунтування, допомагаючи учням наочно досліджувати рух тіл під дією складової сили тяжіння $a_F = m \cdot g \cdot \sin(\alpha)$.

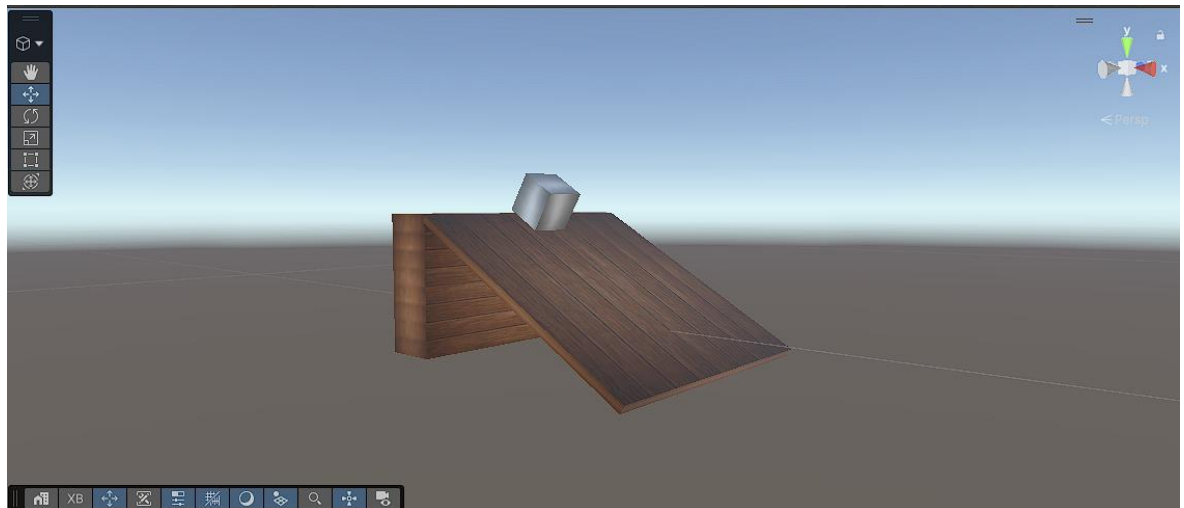


Рисунок 3.3 – Модель похилої площини у Unity 3D.

3.3. Створення програмного забезпечення візуалізації дії фізичних законів у курсі фізики в 10 класі. Розділ 1. Механіка

У провадженні моделей у середовище Unity основна увага була зосереджена на технічній імплементації фізичних законів. Робота почалась з завантаження математичного маятника у рушій. Імпортована з Blender модель повинна перетворитися на функціональний інтерактивний симулятор. Робота була розпочата з налаштування префабу, де для об'єкта кульки було призначено компонент «Rigidbody», що дозволило системі враховувати силу тяжіння та інертність тіла під час проведення віртуального досліджу. Ключовим технічним рішенням стало використання фізичного шарніра «Hinge Joint», за допомогою якого було створено рухоме з'єднання між кулькою та штативом, чітко визначивши вісь обертання та точку підвісу. Це дало змогу обмежити траєкторію руху вантажу ідеальною дугою, що повністю відповідає фізичній моделі

математичного маятника, який вивчається в курсі фізики 10-го класу. Для візуалізації нитки я застосував компонент «Line Renderer», налаштувавши його таким чином, щоб він динамічно з'єднував точку кріплення на штативі з центром мас кульки. При цьому критично важливим було вимкнути параметр Use World Space, аби нитка залишалася стабільною та коректно відображалася в локальних координатах маятника під час його переміщення в AR-просторі. Щоб уникнути миттєвого падіння об'єкта при спавні, я зафіксував його у стані «isKinematic», що дозволило учневі спочатку спостерігати статичну модель, а вже після налаштування параметрів запускати процес коливань, що базується на формулі: $T = 2\pi\sqrt{l/g}$.

Окремим важливим етапом роботи над візуальною складовою проекту стало налаштування текстур та матеріалів, що мало на меті надати маятнику вигляду справжнього лабораторного обладнання. Обираючи матеріали, я орієнтувався на принципи PBR (Physically Based Rendering): для штатива було використано текстуру матового металу, а для кульки — глянцеве покриття з характерними відблисками, що сприяє кращій візуальній ідентифікації приладу учнями 10-го класу в AR-середовищі.

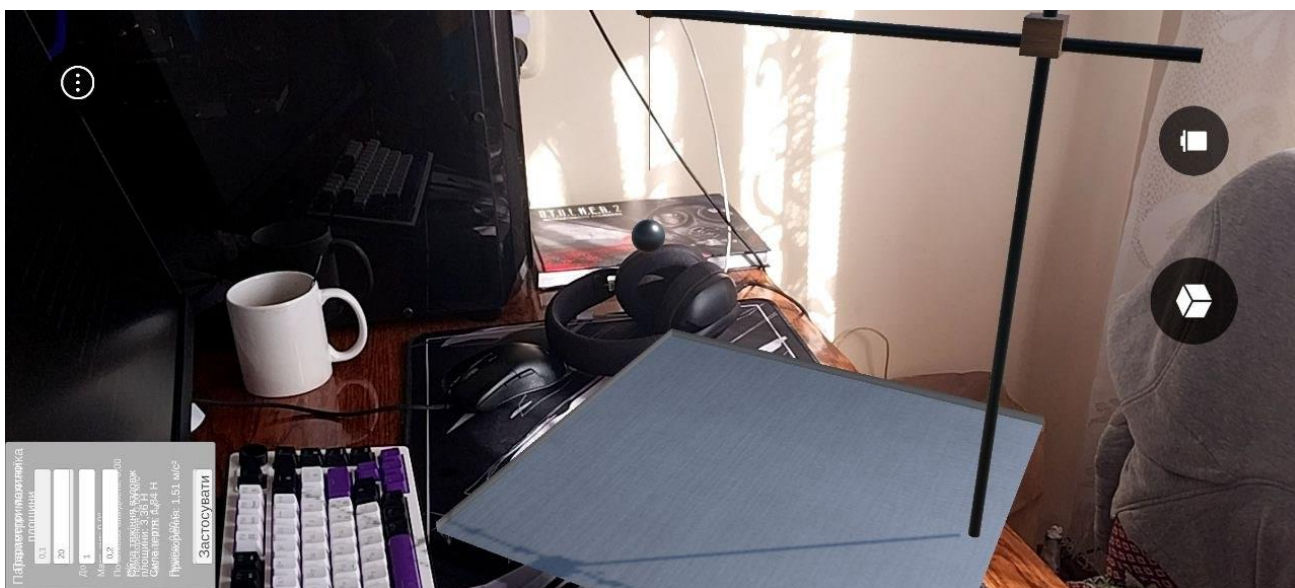


Рисунок 3.4 – Модель математичного маятника у запущеному застосунку.

Останній етап розробки був інтерфейс математичного маятника. Він побудований у простій та зрозумілій формі, щоб користувач міг швидко ввести необхідні початкові дані та одразу отримати результати розрахунків. Основна частина вікна містить поля введення, інформаційні написи з поточними параметрами системи та кнопку для запуску обчислень. Такий підхід робить взаємодію з програмою інтуїтивною, оскільки користувач послідовно задає вхідні параметри, після чого система автоматично виконує всі необхідні обчислення і відображає їх у зручному вигляді.

У верхній частині інтерфейсу розміщено назву модуля, яка вказує на призначення програми. Нижче знаходяться два текстові поля для введення основних вхідних даних. У перше поле користувач вводить масу маятника, а в друге — силу, що діє на систему. Саме ці параметри є початковими даними для подальших обчислень. Поля введення оформлені так, щоб користувач одразу розумів, які саме величини потрібно задати. Після введення даних вони використовуються програмою для математичної обробки та визначення похідних характеристик руху.

Окремо в інтерфейсі виводиться довжина маятника. Вона не вводиться користувачем під час кожного запуску, а встановлена в системі як початкове стандартне значення, яке за замовчуванням дорівнює 20. Це дає змогу відразу виконувати моделювання навіть без додаткового налаштування всіх параметрів. Таким чином, користувач вводить лише ключові величини, а частина параметрів уже підготовлена для зручності роботи.

Після введення вхідних даних програма не просто зберігає їх, а використовує для обчислення низки характеристик математичного маятника. У вікні інтерфейсу відображаються результати розрахунків, що характеризують стан і рух системи. До таких результатів належать

максимальний кут відхилення, початкова швидкість, прискорення, частота коливань і період. Отже, користувач не виконує ці розрахунки самостійно, а отримує вже готові обчислені значення, сформовані програмою на основі введених даних і закладених математичних залежностей.

Інформаційні поля, у яких відображаються результати, мають суто вихідний характер, тобто вони призначені для перегляду, а не для редагування. Це важливо з точки зору зручності та правильності використання програми, оскільки користувач чітко розмежовує, які дані потрібно вводити вручну, а які система формує автоматично. Завдяки цьому зменшується ймовірність помилки під час роботи з програмою і спрощується загальне сприйняття інтерфейсу.

У нижній частині вікна розташована кнопка застосування введених параметрів. Її функція полягає в запуску процесу обчислення після того, як користувач заповнив необхідні поля. Після натискання цієї кнопки система обробляє введені значення, виконує відповідні розрахунки та оновлює вихідні параметри на екрані. Таким чином, кнопка виступає основним елементом керування, який забезпечує зв'язок між введенням даних і отриманням результатів.

Параметри маятника

Маса m

Сила F

Довижна:

Макс. кут:

Початкова швидкість:

Прискорення:

Частота:

Період:

Застосувати

Рисунок 3.5 – Інтерфейс математичного маятника.

Загалом інтерфейс математичного маятника реалізовано таким чином, щоб забезпечити логічну послідовність роботи: спочатку користувач вводить вихідні параметри, далі активує обчислення, а потім аналізує отримані результати. Така організація функціоналу дозволяє ефективно використовувати програму як для навчальних цілей, так і для демонстрації принципів роботи математичного маятника. Інтерфейс не перевантажений зайвими елементами, тому основна увага зосереджується саме на введенні даних та автоматичному відображенні розрахованих характеристик системи.

Другим об'єктом для додавання у середовище Unity був пружинний маятник. Програмна реалізація була спрямована на створення інтерактивного симулятора, який дозволяє учням 10 класу не просто спостерігати за коливаннями, а безпосередньо керувати фізичними параметрами системи в реальному часі. Головна мета інтерфейсу —

зробити складні формули зрозумілими через візуальний досвід доповненої реальності, де кожен введений параметр миттєво змінює поведінку віртуального об'єкта. Для реалізації руху вантажу було створено програмний скрипт, написаний мовою C#. У цьому скрипті реалізовано математичну модель пружинного маятника, яка базується на законі Гука та враховує силу тяжіння. Програма визначає вісь руху між точкою кріплення пружини та нижньою межею її розтягнення, після чого обчислює силу пружності та прискорення вантажу. Отримані значення використовуються для оновлення положення кульки у кожному кадрі симуляції. При цьому рух обмежується межами конструкції маятника, що дозволяє уникнути виходу об'єкта за межі моделі. Для безпосередньої взаємодії з моделлю було розроблено інтуїтивно зрозумілу панель керування «Параметри маятника», де функціонал введення передбачає зміну двох фундаментальних величин, а саме маси вантажу та жорсткості пружини. Користувач вводить значення маси в кілограмах, що в програмній логіці Unity передається в компонент Rigidbody вантажу, змінюючи його інертність, тоді як параметр жорсткості визначає коефіцієнт пружності в налаштуваннях Spring Joint. Після внесення даних натискання кнопки «Застосувати» ініціює миттєве оновлення фізичної моделі, що дозволяє учню відразу побачити, як зміна вхідних чисел впливає на амплітуду та швидкість руху пружини в AR-просторі.

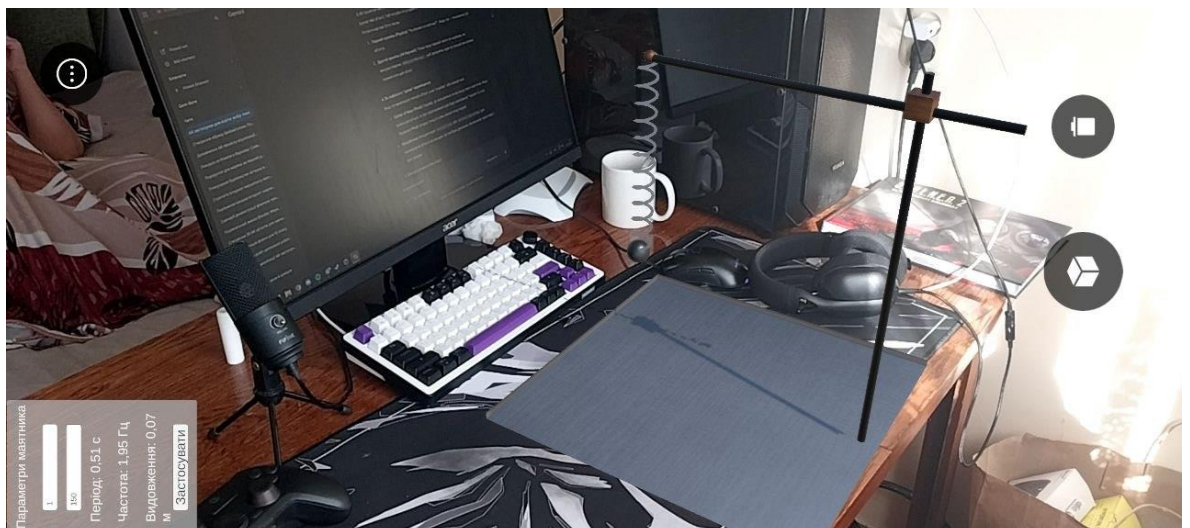


Рисунок 3.4 – Модель пружинного маятника у запущеному застосунку.

Паралельно з візуальним рухом програма виконує роль потужного аналітичного інструменту, виводячи на екран ряд розрахованих показників, серед яких ключовим є період коливань, що обчислюється за класичною фізичною формулою $T = 2\pi\sqrt{(m/k)}$. Окрім періоду, інтерфейс динамічно транслює значення частоти коливань у Герцах та поточне видовження пружини в метрах, що дає змогу учням аналізувати дослід із високою точністю та порівнювати отримані результати з теоретичними розрахунками. Завдяки такій побудові інтерфейсу учень отримує повну інформаційну картину фізичного явища, де збільшення маси вантажу чи зміна жорсткості пружини призводить не тільки до зміни чисел на панелі, а й до візуальної зміни частоти та амплітуди коливань, роблячи абстрактні закони фізики наочними та відчутними.

Параметри маятника

Введіть масу

Жорсткість пружини

Період:

Частота:

Видовження:

Застосувати

Рисунок 3.5 – Інтерфейс пружинного маятника.

Для забезпечення взаємодії користувача з об'єктом було використано інструменти XR Interaction Toolkit. На кореневий об'єкт маятника було додано необхідні компоненти, які дозволяють вибирати об'єкт за допомогою променя взаємодії, а також переміщувати його у просторі. Це дозволяє користувачу розміщувати маятник у будь-якій точці реального середовища під час роботи з додатком у режимі доповненої реальності. При виборі об'єкта система також відстежує стан взаємодії та виконує відповідні дії, зокрема відкриття панелі налаштувань. Для керування параметрами моделі було створено інтерфейс користувача у вигляді окремої панелі налаштувань. Ця панель містить поля введення, які дозволяють змінювати основні параметри системи, а саме масу кульки та коефіцієнт жорсткості пружини. При виборі маятника панель автоматично відображається на екрані, а її поля заповнюються поточними значеннями параметрів. Після введення нових значень користувач може застосувати їх за допомогою відповідної кнопки, що призводить до оновлення фізичних параметрів моделі. Таким чином реалізується можливість дослідження впливу різних параметрів на поведінку пружинної системи.

Останньою реалізованою моделлю стала похила площинна у просторі. Основна задача була поставлена у створенні програмного модуля, що моделює рух бруска по похилій площині в середовищі Unity. Було реалізовано поєднання візуальної 3D-сцени та інформаційно-керуючої панелі. Такий підхід дає змогу одночасно спостерігати сам фізичний процес і змінювати його параметри без переходу до додаткових вікон чи меню. Основна частина екрана відведена під тривимірну модель похилої площини та бруска, що дозволяє наочно відстежувати поведінку об'єкта під час зміни вхідних параметрів. Ліва панель виступає засобом введення даних і відображення результатів розрахунків, завдяки чому користувач одразу бачить, як змінюється фізична модель після введення нових умов.



Рисунок 3.4 – Модель похилої площини у запущеному застосунку.

У верхній частині панелі розміщено поля введення основних параметрів, від яких залежає характер руху тіла по похилій площині. Користувач задає кут нахилу площини, масу бруска та коефіцієнт тертя. Саме ці величини формують початкові умови моделювання і є базою для подальших обчислень. Поле для введення кута нахилу дозволяє визначити геометричне положення площини відносно горизонту, що безпосередньо впливає на складову сили тяжіння вздовж поверхні. Поле введення маси бруска використовується для задання інерційних властивостей тіла, а також для визначення сили тяжіння, що діє на нього. Поле коефіцієнта тертя дозволяє врахувати силу опору руху, яка виникає в місці контакту бруска з площиною. Таким чином, користувач не просто вводить абстрактні числа, а фактично задає фізичні умови експерименту, які потім відтворюються в моделі.

Після введення потрібних параметрів користувач застосовує їх за допомогою відповідної кнопки керування. У цей момент програма виконує перерахунок фізичних величин і оновлює стан моделі. Функціонально це означає, що система зчитує введені значення, перевіряє їх, передає до розрахункового блоку та на основі законів механіки визначає сили, що діють на тіло, а також його прискорення. Такий принцип роботи забезпечує інтерактивність, оскільки будь-яка зміна

параметрів одразу відображається як у числових результатах на панелі, так і у поведінці тривимірного об'єкта на сцені.

Особливістю інтерфейсу є те, що він поєднує введення параметрів із відображенням результатів розрахунку в одному інформаційному просторі. Після обробки даних на панелі виводяться фізичні величини, що характеризують рух тіла по похилій площині. Насамперед відображається сила тяжіння вздовж площини, тобто та складова сили тяжіння, яка спрямована вздовж поверхні і фактично зумовлює рух бруска вниз. Окрім цього, виводиться сила тертя, яка протидіє рухові та залежить від властивостей поверхні й заданого коефіцієнта тертя. Відображення саме цих сил є важливим з навчальної та демонстраційної точки зору, оскільки користувач може бачити, як змінюється співвідношення між рушійною та гальмівною дією в системі.

Окремо система обчислює і виводить прискорення бруска. Це значення є підсумковою характеристикою дії сил у моделі, оскільки воно визначається їх співвідношенням і демонструє, з якою інтенсивністю тіло буде змінювати швидкість під час руху по похилій площині. У межах програмного модуля прискорення виступає не лише розрахунковим параметром, а й важливим індикатором правильності налаштування моделі, адже дозволяє оцінити, як саме задані користувачем умови впливають на кінцевий результат. Завдяки цьому користувач може проводити серію віртуальних експериментів, змінюючи параметри та аналізуючи, як це впливає на сили і прискорення.

Візуальна частина інтерфейсу також має важливе функціональне значення. Тривимірне зображення похилої площини та бруска підсилює сприйняття моделі, оскільки користувач бачить не лише абстрактні результати розрахунків, а й їх фізичне відображення у просторі. Це особливо важливо для навчальних програмних засобів, створених у Unity, адже середовище дозволяє реалізувати не просто статичний інтерфейс, а динамічну сцену з реалістичним положенням об'єктів, перспективою

огляду та інтерактивним сприйняттям процесу. У такому випадку користувач краще розуміє зв'язок між введеними параметрами, розрахованими силами та кінематичним результатом у вигляді прискорення руху.

У програмі закладено початкові параметри моделі: кут нахилу площини встановлено на рівні 20° , масу бруска — 1 кг, а коефіцієнт тертя — 0,2. У коді також передбачено обмеження для введення значень: кут нахилу може змінюватися в межах від 0° до 60° , маса не може бути меншою за 0,1 кг, а коефіцієнт тертя обмежується діапазоном від 0 до 2. Для розрахунків використовується стандартне значення прискорення вільного падіння $9,81 \text{ м/с}^2$. Якщо після обчислень виявляється, що результуюче прискорення менше або дорівнює нулю, рух бруска не запускається, тобто система враховує випадок, коли сили тертя достатньо для утримання тіла в стані спокою. Сам рух реалізується у методі `FixedUpdate()`, де швидкість бруска змінюється поступово відповідно до обчисленого прискорення, а переміщення відбувається від початкової точки до кінцевої вздовж заданого напрямку. Це показує, що програмний модуль не лише виводить сили і прискорення, а й на практиці відтворює фізичну поведінку об'єкта в межах заданої моделі.

З погляду функціоналу, даний модуль виконує одразу кілька завдань: приймає вхідні параметри, опрацьовує їх відповідно до математичної моделі, розраховує сили, що діють на брусок, визначає прискорення і виводить результати у зрозумілому для користувача вигляді. Інтерфейс побудований так, щоб забезпечити простоту використання і водночас достатню інформативність. Користувачу не потрібно виконувати жодних додаткових обчислень вручну, оскільки система автоматично здійснює всі необхідні дії після введення параметрів. Завдяки цьому програмний засіб можна використовувати як для демонстрації фізичних закономірностей, так і для навчального аналізу

залежності між умовами руху та його основними динамічними характеристиками.

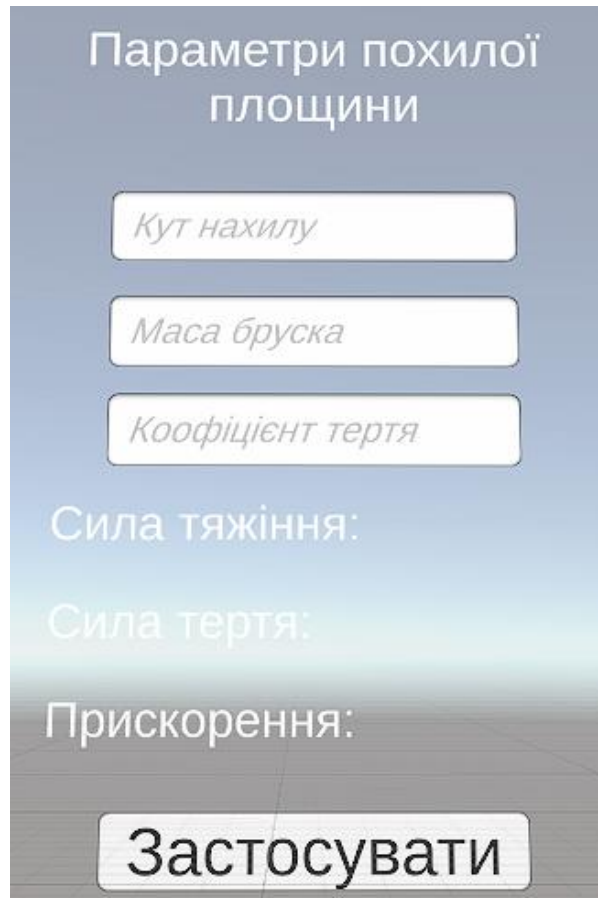


Рисунок 3.5 – Інтерфейс похилої площини.

У цілому інтерфейс модуля похилої площини в Unity є логічно організованим, наочним і функціонально завершеним. Він забезпечує зручне введення вихідних даних, автоматизований розрахунок сил і прискорення, а також зрозуміле представлення результатів у поєднанні з тривимірною візуалізацією. Така реалізація робить програму зручною для користувача і водночас придатною для використання в освітньому середовищі як засіб інтерактивного вивчення механічного руху тіла по похилій площині.

ВИСНОВКИ

Впровадження технологій доповненої реальності у навчальний процес є стратегічно важливим кроком, оскільки цей інструмент дозволяє подолати головний бар'єр у вивченні фізики — абстрактність

теоретичних законів та неможливість візуалізації прихованих процесів у реальному часі. Використання AR у школах трансформує звичайний підручник у динамічне дослідницьке середовище, де кожен учень отримує можливість проводити складні експерименти без потреби у дорогому чи небезпечному обладнанні.

Розроблений у межах даної дипломної роботи застосунок на базі рушія Unity є прямим підтвердженням ефективності таких технологій. Програмний продукт, що фокусується на моделюванні пружинного та математичного маятників, а також на дослідженні руху тіла по похилій площині, демонструє високу точність відтворення фізичних явищ завдяки потужним вбудованим алгоритмам обробки фізики. Головна перевага розробки полягає в інтерактивності, адже користувач може самостійно змінювати масу вантажу, жорсткість пружини чи кут нахилу площини, спостерігаючи за миттєвою реакцією системи. Це дозволяє наочно продемонструвати дію сил, які зазвичай залишаються невидимими, зокрема векторів прискорення, реакції опори та сили тертя. Застосування даного додатка на уроках фізики здатне докорінно змінити сприйняття предмета учнями, перетворюючи пасивне слухання на активне дослідження. У контексті суцільної цифровізації, коли смартфон є у кожного школяра, такий застосунок вирішує проблему нестачі матеріально-технічної бази в кабінетах фізики та відкриває нові можливості для дистанційного навчання. Учні отримують змогу проводити лабораторні роботи вдома, зберігаючи при цьому високу якість експериментальних даних та візуальну точність процесів.

Загалом результати роботи над проєктом дозволяють стверджувати, що інтеграція AR-застосунків у шкільну програму є необхідною умовою для підготовки фахівців майбутнього. Створений програмний продукт не лише підтверджує технічну можливість реалізації складних фізичних моделей у доповненій реальності, а й виступає як повноцінний дидактичний матеріал. Він доводить, що поєднання ігрових технологій з

академічними знаннями створює потужний синергетичний ефект, роблячи навчання максимально наочним, безпечним та ефективним для сучасного покоління здобувачів освіти. Використання Unity для розробки таких інструментів забезпечує гнучкість та можливість масштабування проєкту, що в майбутньому дозволить розширити бібліотеку віртуальних експериментів для інших розділів фізики.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Доповнена реальність у навчанні студентів із особливими освітніми потребами Вікторія Василівна Ткачук, Юлія Володимирівна Єчкало, Оксана Миколаївна Маркова.
2. Волинець, В.О. (2021). Віртуальна, доповнена і змішана реальність: сутність понять та специфіка відповідних комп'ютерних систем.
3. НОВІ ПЕРСПЕКТИВИ ОСВІТНЬОГО ПРОЦЕСУ: ВІРТУАЛЬНА ТА ДОПОВНЕНА РЕАЛЬНІСТЬ Тимчина В., Тимчина Н., 2020
4. Використання віртуальної та доповненої реальності в українській освіті Хміль Наталія Анатоліївна¹, Галицька-Дідух Тамара Вячеславівна, Ван Цяньці 2023
5. Використання цифрових технологій у процесі змішаного навчання в закладах загальної середньої освіти: метод. рекомендації / Коваленко В. В., Мар'єнко М. В., Сухих А. С. / За ред. М. В. Мар'єнко, А. С. Сухих. Київ : ІТЗН НАПН України, 2021. 87 с., іл.
6. Ткачук В.В., Семеріков С.О., Єчкало Ю.В., Маркова О.М., Мінтій М.М. Засоби розробки доповненої реальності для Web: порівняльний аналіз. Фізико-математична освіта. 2020.
7. ДЕРЕВО РІШЕНЬ З ВИБОРУ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ Л. В. Потрашкова, М. Д. Гмирак 2023
8. О.В. Слободяник, Київ, Україна ДОПОВНЕНА РЕАЛЬНІСТЬ В ПОЗАУРОЧНІЙ РОБОТІ (ПІДГОТОВЧИЙ ЕТАП)
9. [Офіційна документація Unreal Engine: Handheld AR Template Quickstart in Unreal Engine](#)
10. ВПЛИВ VR /AR НА ТЕХНОЛОГІЇ НАВЧАННЯ Й ОСВІТЯНСЬКІ ПРАКТИКИ Соколюк О. М. м. Київ, Україна DOI: 10.31652/2412-

1142-2021-60-108-116 Інститут інформаційних технологій та засобів навчання НАПН України

11. Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання у підготовці фахівців: методологія, теорія, досвід, проблеми : збірник наукових праць. Вінниця : ТОВ «Друк плюс», 2020. Вип. 55. 268 с.
12. ТЕХНОЛОГІЯ ВИКОРИСТАННЯ ІМЕРСИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ЕМОЦІЙНОГО ІНТЕЛЕКТУ УЧНІВ
Світлана Литвинова м. Київ, Україна 2025
13. ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ ЗАСТОСУВАННЯ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ОСВІТНЬОМУ ПРОЦЕСІ Франчук Наталія Петрівна 2025
14. Unity Manual: Unity's Interface. *Джерело:*
<https://docs.unity3d.com/Manual/UsingTheEditor.html>
15. Unity Manual: Creating and Using Scenes. *Джерело:*
<https://docs.unity3d.com/Manual/CreatingScenes.html>
16. Unity Manual: GameObjects. *Джерело:*
<https://docs.unity3d.com/Manual/GameObject.html>
17. Unity Scripting API: Transform. *Джерело:*
<https://docs.unity3d.com/ru/2019.4/Manual/Transforms.html>
18. Unity Manual: Prefabs. *Джерело:*
<https://docs.unity3d.com/Manual/Prefabs.html>
19. NVIDIA PhysX SDK Documentation. *Джерело:*
<https://developer.nvidia.com/physx-sdk>
20. ПОРІВНЯННЯ ІГРОВИХ РУШІЇВ UNREAL ENGINE ТА UNITY
Лісін О. А. м. Харків, Україна
21. ПОРІВНЯННЯ ДВИЖКІВ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ІГРОВИХ ДОДАТКІВ UNREAL ENGINE 4 ТА UNITY 3D Пісарев Д.С

22. ПОРІВНЯННЯ НАВЧАННЯ З ПІДКРІПЛЕННЯМ В ІГРОВИХ РУШІЯХ UNREAL ENGINE 5 ТА UNITY Лайтарук І.Ф Гришанович Т.О. Онищук О.О. 2025
23. AR App Development Challenges & Solutions — Qodequay. URL: <https://www.qodequay.com/conquer-ar-app-development-challenges>
24. Augmented Reality Guide 2026 — Treeview Studio. URL: <https://treeview.studio/blog/augmented-reality-ar-complete-guide>
25. AR Foundation Manual — Unity Documentation. URL: <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.xr.arfoundation@latest/>
26. Augmented Reality Outlook 2025-2030 — Emerline. URL: <https://emerline.com/blog/ar-future-for-consumers>
27. AR App Development in 2026 — Imaginovation. URL: <https://imaginovation.net/blog/ar-app-development-guide-for-brands/>
28. Blender 4.3 Reference Manual. [Modeling Introduction](#). Офіційний посібник.
29. Autodesk Maya Help. [Polygonal Modeling Overview](#). Офіційна документація.
30. Autodesk 3ds Max Help. [Modeling Methods in 3ds Max](#). Офіційна документація.
31. Muhammad, S., & Na bila Fitri, K. (2023). Analysis in 3D Rendering Modeling Processing using Autodesk Maya and Blender Software. Recent in Engineering Science and Technology
32. The Comparison Between 3D Studio Max and Blender Based on Software Qualities Yeka Hendriyani and Vania Amanda Amrizal 2019

