

ТРИВИМІРНИЙ СИМУЛЯТОР ОПЕРАЦІЙНОГО БЛОКУ ІЗ ЗАПРОГРАМОВАНОЮ ВАРІАТИВНІСТЮ ГІГІЄНІЧНИХ НОРМАТИВІВ

Ткаченко В.П.

к.т.н., професор, кафедра «Медіасистеми та технології»,
Харківський національний університет радіоелектроніки

Завгородній І.В.

д.мед.н., професор, кафедра гігієни та екології,
Харківський національний медичний університет

Літовченко О.Л.

Ph.D, доцент, кафедра гігієни та екології,
Харківський національний медичний університет

Лисак М.С.

асистент, кафедра гігієни та екології,
Харківський національний медичний університет

Парамонов А.К.

старший викладач, кафедра «Медіасистеми та технології»,
Харківський національний університет радіоелектроніки

Ліхініна Р.В.

магістр, кафедра «Медіасистеми та технології»,
Харківський національний університет радіоелектроніки

***Анотація.** У роботі представлено симулятор операційного блоку з варіативним моделюванням гігієнічних нормативів, що забезпечує різноманіття створюваних віртуальних приміщень. Інструмент реалізує можливість інтерактивного проведення гігієнічної оцінки та відтворення контрольованої кількості порушень нормативів для навчальних цілей.*

***Ключові слова:** СИМУЛЯТОР, 3D-МОДЕЛЮВАННЯ, ВІРТУАЛЬНА РЕАЛЬНІСТЬ, UNITY, ГІГІЄНІЧНА ОЦІНКА, ІМЕРСИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ.*

Вступ

У ХХІ столітті світ переживає масштабну цифрову трансформацію, яка охопила практично всі сфери діяльності, зокрема й освіту. Застарілі моделі навчання поступово модернізуються або замінюються сучасними методами, що активно інтегрують цифрові технології. Серед найбільш перспективних напрямків виділяються імерсивні технології – віртуальна (VR), доповнена (AR) та змішана (MR) реальність. Технології, які спершу застосовувалися переважно в сфері розваг, згодом успішно зарекомендували себе в таких важливих галузях, як інженерія, архітектура, оборонна промисловість, виробництво, а також у медичній сфері.

Медична освіта становить особливо сприятливе середовище для впровадження імерсивних технологій. Ускладнена будова анатомічних систем, потреба у відпрацюванні інвазивних маніпуляцій, висока вартість помилок у реальних клінічних умовах, а також етичні обмеження при взаємодії з пацієнтами обумовлюють необхідність створення безпечних, контрольованих і максимально наближених до реальності навчальних просторів [1]. Сучасна медична освіта зіштовхується з низкою викликів, зокрема інформаційним перенасиченням, потребою впровадження компетентнісного підходу та необхідністю врахування індивідуальних стилів навчання здобувачів освіти. У цьому контексті 3D-технології відкривають нові можливості, сприяючи візуалізації, інтерактивності та персоналізації освітнього процесу. Ефективність їхнього застосування дедалі частіше підтверджується результатами наукових досліджень, які демонструють переваги над традиційними формами навчання [2, 3].

Освітній компонент «Гігієна та екологія» посідає унікальне місце в системі медичної підготовки. Він формує основу профілактичного напрямку медицини, який є не менш важливим, ніж лікувальний. Якщо клінічні дисципліни фокусуються на діагностиці та лікуванні вже існуючих захворювань, то гігієна та екологія спрямовані на вивчення впливу факторів навколишнього та виробничого середовища на здоров'я людини та розробку заходів для запобігання хворобам, збереження та зміцнення здоров'я населення [4].

Зміст гігієни як науки визначається переліком її основних галузей, серед яких: комунальна гігієна (включаючи водопостачання, стан якості повітря, планування міст, окремих споруд та приміщень), гігієна праці (оцінка виробничих ризиків), гігієна харчування (забезпечення безпеки продуктів і здорового харчування), гігієна дітей і підлітків, радіаційна гігієна, військова гігієна і т.д. Знання цих аспектів є критично важливими для медичних фахівців усіх спеціальностей, оскільки навколишнє середовище і спосіб життя відіграють вирішальну роль у розвитку багатьох захворювань, як інфекційних, так і неінфекційних [5].

Історично саме розвиток гігієни та санітарії призвів до значного покращення показників громадського здоров'я. Тому обов'язковість вивчення цього освітнього компонента та його включення до ліцензійних іспитів (зокрема, Крок-2 в Україні) є абсолютно виправданою, підтверджуючи його статус як невід'ємної частини базової професійної компетентності лікаря.

Незважаючи на фундаментальну важливість освітнього компонента, традиційні методи його викладання часто стикаються з низкою суттєвих викликів, що обмежують ефективність засвоєння матеріалу та формування практичних навичок. Серед основних проблем: перевага теорії над практикою, пасивність лекційного формату, інформаційна сталість друкованих матеріалів, логістичні та безпекові труднощі організації реальних виїзних занять, неможливість симуляції різноманітних сценаріїв (особливо небезпечних) та складність об'єктивної оцінки практичних навичок [6]. Це призводить до так

званого «розриву між знанням і дією» («knowing-doing gap»), коли теоретичні знання недостатньо трансформуються в практичну компетентність.

Однією з ключових переваг імерсивних технологій є можливість створення тривимірних, деталізованих та динамічних моделей, які забезпечують глибоку візуалізацію складних систем і процесів.

VR/AR-середовища забезпечують новий рівень активної участі здобувачів у навчальному процесі. Ці технології ефективно долають одну з головних проблем традиційної освіти – складність перенесення теоретичних знань у практичну площину. Імерсивні технології дають змогу створити навчальні ситуації, максимально наближені до реальності. Така інтерактивність активізує навчальну діяльність, розвиває мотивацію до здобуття знань і сприяє більш глибокому розумінню матеріалу. Концепція «навчання через діяльність» (learning by doing), реалізована у VR-середовищах, довела свою ефективність у багатьох педагогічних дослідженнях, особливо в галузях, де важливі практичні навички [7].

Ще однією перевагою VR/AR/3D-технологій є можливість адаптації навчання до індивідуальних потреб здобувача. Кожен може засвоювати матеріал у зручному темпі, повертатись до складних моментів, отримувати зворотний зв'язок про свої дії в режимі реального часу. Навчальні платформи з елементами штучного інтелекту можуть автоматично змінювати рівень складності завдань залежно від успішності здобувача, що забезпечує глибше засвоєння знань і розвиток аналітичного мислення, самостійності, відповідальності. Такий підхід особливо важливий у вивченні освітніх компонентів, що вимагають не лише засвоєння інформації, а й вироблення рішень у змінних обставинах – а саме це й становить суть гігієнічної практики [8].

Одним із найбільш очевидних та ефективних застосувань 3D-технологій у викладанні гігієни є створення інтерактивних симуляцій для відпрацювання навичок гігієнічної оцінки об'єктів. Ці симуляції являють собою реалістичні віртуальні копії різноманітних середовищ (кухні, лікарняні палати, виробничі цехи, житлові приміщення), в які програмно «вбудовані» типові або специфічні гігієнічні порушення [12]. Хоча досліджень конкретно по гігієнічній оцінці ще небагато, успішний досвід використання VR для тренувань в інших сферах, що потребують інспекції та дотримання протоколів (наприклад, пожежна безпека, лабораторна безпека [13], навчання клінічним процедурам [1]), свідчить про високий потенціал цього підходу.

Здобувачі можуть проводити віртуальні інспекції, використовуючи віртуальні інструменти, ідентифікувати порушення норм освітлення, мікроклімату, чистоти, зберігання продуктів, поводження з відходами тощо.

Переваги таких віртуальних інспекцій включають: абсолютну безпеку при роботі в потенційно небезпечних симульованих середовищах, необмежену можливість повторення для відпрацювання навичок (навмисна практика), контрольованість та гнучкість сценаріїв, стандартизацію навчального досвіду, можливість об'єктивної оцінки дій здобувача за допомогою зібраних системою

даних та потенційну економічну ефективність у довгостроковій перспективі порівняно з організацією реальних виїздів [9, 14].

Потенціал імерсивних технологій у викладанні гігієни та екології далеко не вичерпаний. Майбутні напрямки розвитку включають інтеграцію зі штучним інтелектом для створення адаптивних сценаріїв та надання інтелектуального зворотного зв'язку, розробку колаборативних віртуальних середовищ для командної роботи (наприклад, симуляція розслідування спалаху) та ширше використання гаптичних технологій (з тактильним зворотнім зв'язком) для підвищення реалізму [15].

Однак широке впровадження 3D-технологій стикається і з певними викликами: висока початкова вартість розробки та обладнання, потреба в технічній експертизі, необхідність ретельної педагогічної інтеграції (уникнення використання технологій заради технологій), потенційні побічні ефекти (кіберхвороба) та проблема забезпечення рівного доступу для всіх здобувачів [1, 14].

Підсумовуючи, можна з упевненістю стверджувати, що імерсивні 3D-технології (VR, AR, MR) мають величезний трансформаційний потенціал для викладання освітнього компонента «Гігієна та екологія» в медичних навчальних закладах. Вони дозволяють подолати багаторічні обмеження традиційних підходів, пропонуючи безпрецедентні можливості для візуалізації, активної взаємодії та формування стійких практичних навичок у безпечному, контрольованому та інтерактивному середовищі. Створення та впровадження віртуальних симуляцій для гігієнічної оцінки об'єктів є одним із найбільш перспективних напрямків [11]. Незважаючи на існуючі виклики, переваги використання 3D-технологій для підвищення ефективності навчання, рівня компетентності та впевненості випускників є надто значними, щоб їх ігнорувати. Інвестиції в ці технології сьогодні – це інвестиції в більш кваліфікованих та краще підготовлених лікарів завтра, здатних ефективно відповідати на виклики громадського здоров'я у сучасному світі. Подальший розвиток та інтеграція імерсивних технологій, безсумнівно, визначатимуть майбутнє медичної освіти [10].

Мета та завдання роботи

Метою роботи є розробка тривимірного симулятора операційного блоку з можливістю автоматизованої генерації варіативних просторових моделей відповідно до гігієнічних нормативів та контрольованого відтворення їх порушень як інноваційного інструменту для підвищення ефективності викладання освітнього компонента «Гігієна та екологія» в закладах вищої медичної освіти.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання: провести аналіз та формалізацію вимог нормативної документації, створити ряд тривимірних моделей об'єктів, розробити послідовність та логіку генерації об'єктів, розробити сценарії взаємодії користувача з системою, програмно реалізувати симулятор, провести тестування системи.

Основна частина

Функції симулятора

Симуляція є імітацією реального процесу або ситуації, що передбачає відтворення ключових властивостей об'єкта. Ефективна симуляція має забезпечувати таку взаємодію, яка наближена до реальних умов і дозволяє користувачеві досягати навчальних результатів шляхом повноцінного занурення в середовище.

Згідно з метою роботи, розроблений симулятор приміщень операційного блоку орієнтований переважно на студентів медичних закладів освіти та виконує функцію інтерактивного інструменту для відпрацювання практичних навичок. Щоб досягти максимальної ефективності, симулятор має забезпечувати високий рівень інтерактивності, реалістичності та варіативності і різноманіття генерованих моделей медичних приміщень.

З огляду на тематику роботи, усі моделі у створюваному віртуальному середовищі мають відповідати не лише реальним об'єктам, а й чинним нормативним вимогам [16-19]. Дотримання цих вимог дозволяє формалізувати набір необхідних моделей, визначити їх кількість, просторове розташування та властивості поверхонь (текстури), а також однозначно класифікувати реалізації як коректні або такі, що містять порушення нормативів.

Загалом симулятор має виконувати наступні функції:

- зберігати варіанти значень параметрів об'єктів згідно нормативних вимог;
- автоматизовано генерувати тривимірні об'єкти з випадковим варіантом з множини доступних значень параметрів;
- генерувати задану кількість елементів, що суперечать нормативним вимогам;
- формувати перелік помилкових реалізацій, що додані у модель приміщення;
- надавати можливість пересування та перегляду користувачем всіх об'єктів створеного віртуального приміщення;
- надавати можливість взаємодії користувача з моделями об'єктів для отримання інформації та позначення помилкових генерацій;
- надавати можливість перезапуску для повторної генерації блоку приміщень та завершення перегляду приміщення;
- розраховувати оцінку результатів роботи користувача.

Відповідно до визначених функцій симулятора, його архітектуру можна поділити на три функціональні компоненти:

- генератор приміщення – автоматизоване створення тривимірної моделі операційного блоку на основі формалізованих нормативних вимог;
- симулятор віртуального середовища – режим взаємодії користувача з моделлю приміщення у форматі дослідження та навігації;
- опитування результатів – фіксація виявлених порушень та оцінка гігієнічної відповідності користувачем.

Найбільш об'ємною складовою проєкту є генератор віртуального приміщення. Одразу після запуску застосунку він виконує автоматизовану генерацію унікальної моделі операційного блоку на основі параметрів, обраних випадковим чином у межах допустимих значень. При цьому передбачається фіксована кількість об'єктів із навмисно заданими помилками нормативних вимог. Вся інформація про створену модель та вмонтовані порушення, зберігається у файлі опису сцени. Ці дані надалі використовуються для автоматичної перевірки правильності оцінки гігієнічного стану приміщення.

Після завершення генерації застосунком переходить у режим симуляції, який дозволяє користувачеві вільно пересуватись в межах віртуального простору з урахуванням колізій об'єктів, оглядати кімнати та елементи інтер'єру, а також взаємодіяти з ними.

У разі вибору певного об'єкта в приміщенні активується модуль опитування, який надає варіанти відповідей щодо його відповідності нормативам. Після завершення огляду результати, обрані користувачем, порівнюються з реальними характеристиками моделі відповідного об'єкта. На основі цього формується підсумок гігієнічної оцінки приміщення, який автоматично конвертується в оцінку за 100-бальною шкалою.

Етапи створення симулятора

Для розробки віртуального середовища та його подальшого використання система потребує вбудований набір тривимірних моделей частин приміщення, приладів, предметів наповнення та відповідних текстур. Розробка тривимірних моделей медичних приміщень потребує фіксованого переліку необхідних складових об'єктів та їх визначених характеристик (допустимі текстури, колір випромінюваного світла тощо) до початку моделювання. Цей перелік визначається в процесі формалізації нормативних вимог. За цим переліком створюються моделі об'єктів та відповідні текстури. Перед етапом розробки системи генерації приміщень спеціального призначення, необхідно визначитись з логікою генерації, а також розробити сценарій взаємодії з користувачем. Завершальними етапами роботи стануть реалізація системи як єдиного застосунку та його подальше тестування.

Таким чином розробка симулятора медичних приміщень операційного блоку складається з наступних етапів:

- аналіз чинних державних стандартів та нормативних документів;
- формалізація нормативних вимог до об'єктів для створення коректних та помилкових варіацій;
- створення тривимірних моделей і текстур;
- розробка сценарію генерації приміщень;
- розробка сценарію взаємодії з користувачем;
- програмна реалізація системи;
- тестування системи.

Формалізація нормативних вимог

Моделювання приміщень спеціального призначення таких як медичні вимагає не просто геометричного моделювання, а попередньої формалізації нормативних вимог до параметрів моделі. Зі стандартів за основу взято Державні будівельні норми України для громадських будівель та споруд, закладів охорони здоров'я [16], Державні санітарні норми та правила [17] й інші офіційні документи, де описані гігієнічні вимоги до операційних блоків (площі, вентиляція, обробка поверхонь, водопостачання, вимоги до стін/стелі/підлоги, розділення чистих і брудних зон тощо) [18] та оснащення приміщень [19]. Поточні чинні державні норми діють на новозбудовані та реконструйовані будівлі закладів охорони здоров'я (ЗОЗ). Як правило, до них застосовуються різні вимоги, причому до споруд нового будівництва вони вищі та жорсткіші. У створюваному симуляторі блок медичних приміщень слід вважати частиною будівлі ЗОЗ після реконструкції.

Визначені в нормативних документах вимоги до приміщень закладів охорони здоров'я, зокрема операційних блоків, запропоновано поділити на архітектурні та функціональні залежно від їх впливу на модель.

Архітектурні вимоги визначають взаємне розташування, розмір та співвідношення площ кімнат, їх розташування на відповідних поверхах тощо. Компонування приміщень операційного блоку, у відповідності з вимогами, можна формалізувати у конкретні плани блоку та реалізувати у вигляді коректних та некоректних планів. Також вони напряду впливають на створення моделей частин кімнати.

Для визначення розмірів операційної зали, наприклад, згідно загальних архітектурних вимог до будівель ЗОЗ висота приміщень (у просвіті від верху конструкції підлоги до низу конструкції стелі) при новому будівництві надземних поверхів ЗОЗ приймається не менше ніж 3 м, при реконструкції – від 2,5 м. Висота підземного, підвального та цокольного поверхів від підлоги до стелі повинна бути не менше ніж 2,7 м. Згідно архітектурних вимог до приміщень операційних відділень, глибина лікувально-діагностичних приміщень при денному освітленні їх з одного боку повинна бути не більше ніж 6 м. Глибина операційних має бути не менше ніж 5 м. Відношення глибини до ширини лікувально-діагностичних приміщень має бути не більше ніж 2:1, а необхідна площа операційного приміщення 42 м² для нового будівництва та 30 м² для реконструкції [16]. Оптимальним розміром кімнати у такому випадку є 2,7×5×6 м. Ці значення лягають в основу створення тривимірних моделей підлоги, стін та стелі такого типу приміщення.

Функціональні вимоги до приміщень визначають характеристики об'єктів, що безпосередньо наповнюють приміщення, наприклад їх кількість та розташування у кімнатах, покриття поверхонь або колір випромінюваного світла. Вони поділяються на предметні та непередметні.

Вимоги предметного характеру забезпечуються наявністю та відповідністю моделей об'єктів. Наприклад, згідно державних санітарних норм

в приміщеннях клінічних структурних підрозділів ЗОЗ краї підлоги біля стін повинні бути заведені на стіни на висоту мінімум 80 мм; в приміщеннях, в яких необхідно дотримуватися вимог стерильності – на висоту мінімум 150 мм.

Вимоги непередметного характеру, такі як температура, вологість та освітленість, вирішено відтворювати у віртуальному приміщенні за допомогою допоміжних об'єктів, зокрема даних про значення параметрів мікроклімату та вимірювальних приладів, за якими користувач зможе дізнатися ці характеристики. Наприклад, згідно функціональних вимог приміщення повинно мати освітлення, спектр випромінювання якого наближений до спектра природного світла. До некоректних реалізацій в даному випадку буде віднесено відсутність ламп або разюча відмінність кольору штучного світла від сонячного.

У результаті формалізації вимог до операційного блоку отримано таблицю (табл. 1) з даними назв необхідних до створення об'єктів, їх варіацій моделей, матеріалів та інших параметрів.

Таблиця 1 – Фрагмент таблиці формалізації вимог

Назва об'єкту	Коректна реалізація	Помилкова реалізація
Підлога операційного приміщення	Модель 1c1; текстура 0c1, 0c2, 0c3, 0c4, 0c5, 0c6, 0c7 або 0c8	Модель 1w1 або 1w2; текстура 0w1, 0w2, 0w3, 0w4, 0w5, 0w6 або 0w7
Світильник стельовий	Наявність об'єкту; 4, 5 або 6 екземплярів; модель 6c1, 6c2, 6c3 або 6c4; текстура 0c38 або 0c39	Відсутність об'єкту; модель 6w1, 6w2 або 6w3; текстура 0w28, 0w29 або 0w30
Стіл операційний	Наявність об'єкту в межах моделі операційної кімнати; 1 екземпляр; модель 10c1, 10c2 або 10c3; текстура основи 0c29, 0c30, 0c31 або 0c32, робочої поверхні – 0c36, 0c37 або 0c38	Відсутність об'єкту в межах моделі операційної кімнати; 2-3 екземпляри; текстура робочої поверхні 0w33, 0w34, 0w35, 0w36 або 0w37
Рухома хірургічна безтіньова лампа	Наявність об'єкту в межах моделі операційної кімнати; модель 10c4 або 10c5; текстура 10c1c1, 10c1c2, 10c2c1 або 10c2c2	Відсутність об'єкту в межах моделі операційної кімнати
Дифузор ламінарного повітряного потоку	Наявність об'єкту в межах операційної кімнати; модель 5c1 або 5c2; текстура 5c1c1, 5c2c1 або 5c2c2	Відсутність об'єкту в межах моделі операційної кімнати; модель 5w1; текстура 5c2w1
Монітор індикації	Наявність об'єкту в межах операційної кімнати; модель 10c11; текстура 10c11c1 або 10c11c2; відображення значень параметрів мікроклімату	Відсутність об'єкту в межах моделі операційної кімнати
Кран водопровідний	Об'єкт розташовано відповідно до розташування медичної раковини для миття рук; модель 10c16; текстура 0c29 або 0c30	Модель 10w7 або 10w8; текстура 0w31
Кисневий балон	Відсутність моделі	Наявність моделі (модель 12w8, текстура 12w8c1)
Вентиляційна решітка видалення повітря нижньої зони	Наявність моделі; 4 екземпляри; розташування на рівні 0,15-0,32 м вище підлоги; модель 5c4 або 5c5; текстура 0c29, 0c30 або 0c32	Відсутність моделі; 1-3 екземпляри; розташування на 0,4-0,6 м вище підлоги

Для зручності подальшого обігу даних моделі та текстури позначено шифром, де перша цифра позначає номер групи об'єкту, наступна літера – коректний чи некоректний об'єкт (від англ. correct та wrong відповідно), наступна цифра – номер мешу (тривимірної геометрії). Подальша літера (с або w) та цифра позначають коректність та номер текстури, специфічної для цієї моделі. Шифр загальних текстур (пластик, скло, метал тощо) є трицифровим та починається з 0, адже не має конкретної моделі, до яких вони відносяться. Наприклад, 1c1 позначає модель підлоги з заведеними на 15 см краями, 1w1 – на 8 см, 1w2 – без заведених країв.

Підготовка моделей наповнення та текстур

Всі моделі елементів інтер'єру приміщень поділено на 2 категорії [20]: специфічні – тип, положення, характеристики та кількість яких упорядковуються нормативними документами, та загальні – до яких не висунуто державних вимог, але які властиві операційним блокам і додають реалістичності інтер'єру та додатково сприятимуть варіативності отримуваних приміщень. Згідно отриманого переліку формалізованих вимог та необхідних у проєкті об'єктів, для реалізації віртуального середовища операційного блоку було розроблено 119 тривимірних моделей об'єктів.

Створення тривимірних моделей було проведено у програмному пакеті Blender за допомогою методу полігонального моделювання. Такий підхід дозволяє досягти високої точності у формуванні геометрії об'єктів при відносно невеликому розмірі файлу моделі, що зменшує навантаження на обчислювальну та графічну системи при їх обробці та візуалізації сцени.

Під час підготовки файлів геометрії моделі застосовується операція трансформації «Apply All Transforms» з метою уникнення викривлень масштабу або кута обертання моделі після експорту. Також перевіряються нормалі поверхонь та виконується тріангуляція геометрії. При експорті найчастіше використовуються формати FBX та GLTF/GLB. У рамках цього проєкту моделі експортовано у форматі FBX, оскільки саме він використовується тривимірним рушієм Unity.

Вимоги до матеріалів поверхонь реалізовано шляхом текстурування моделей. Основними характеристиками є колір, шорсткість та висотна карта (height map), що формують рельєфність поверхні. Для їх розробки використано інструмент Shader Editor у Blender, який дозволяє створювати процедурні матеріали. Такий підхід забезпечує реалістичне візуальне відтворення матеріалів без необхідності зовнішніх зображень текстур, формуючи властивості поверхні за допомогою математичних алгоритмів. Текстури створено з урахуванням реалістичності та відповідності матеріалам обладнання, зазначеним у нормативній документації. Для підвищення достовірності при моделюванні та текстуруванні використовувалися фотознімки реальних операційних блоків.

Для моделей конструктивних елементів приміщення (підлога, стіни, стеля) переважно використовуються унікальні матеріали. Натомість для предметів інтер'єру найбільш поширеними є матеріали, що імітують білий пластик,

гладкий метал та поверхню екрана. У кольоровій гамі переважають світлі тони, зокрема білий, світло-блакитний та сірий, що сприяють візуальному сприйняттю чистоти й стерильності, а також не викликають візуального навантаження або роздратування у користувача.

Для експорту матеріалів проведено запікання (baking) базового кольору, карти нормалей та карти шорсткості текстур, результати якого збережено у форматах .png та .jpg.

Сценарій генерації

Створення віртуального операційного блоку починається з каркасу приміщень. Сценарій наповнення інтер'єру реалізується у вигляді послідовності кроків, що визначають розміщення моделей у кімнатах. Для кожної з виділених груп об'єктів при генерації використовуються заздалегідь підготовлені набори варіацій тривимірних моделей. Помилкові реалізації та варіанти моделей, що не відповідають нормативним вимогам, застосовуються для навмисного додавання порушень. Кожен об'єкт містить інформацію про допустимі варіації параметрів та відповідні теги причин порушень. За відсутності таких тегів об'єкт не зможе бути позначений як помилковий.

Розробка сценарію генерації починається з визначення категорій об'єктів, кожна з яких має власний перелік доступних елементів для вибору. У даному проєкті генерація як самого приміщення, так і його наповнення відбувається у хронологічному порядку від складових каркасу кімнати (підлога, стіни та стелі) до внутрішніх об'єктів таким чином, аби завжди реалізація поточного етапу була важливіша за наступний, але не була здатна унеможливити (через перетин геометрії моделей) або знизити варіативність його помилкових реалізацій.

Генерація дверей у створеному порожньому каркасі кімнати є пріоритетом через необхідність прохідності сцени (з'єднанням між кімнатами блоку) та відсутність впливу на генерацію системи вентиляції. Отвори притоку повітря можуть бути згенеровані на стінах (відносно невеликі хепа-фільтри) або стелі (ламінарні дифузори повітря, що мають займати до чверті площі стелі), а об'єкти освітлення – лише на стелі. Генерація ламп освітлення першими значно знизить шанс реалізації стельової варіації вентиляційних отворів, що негативно вплинуло б на варіативність помилкових реалізацій. Тому генерація вентиляційних отворів є у пріоритеті перед освітленням.

Параметри, що визначені вимогами, проте не відображаються безпосередньо у вигляді тривимірних моделей, генеруються останніми. Винятком є значення параметрів мікроклімату, які мають використовуватись у відображенні на настінному моніторі індикації (прилад, необхідний в приміщенні операційної зали).

Згідно такої логіки всі об'єкти з переліку формалізованих вимог поєднано у 14 груп-етапів генерації:

- покриття підлоги приміщень;
- стіни приміщень та віконні прорізи;
- стелі приміщень;

- дверні блоки;
- вентиляційні отвори та канали;
- освітлювальні прилади та вимикачі;
- об'єкти протипожежної безпеки;
- медичні газові розетки та трубопроводи медичних газів;
- значення параметрів мікроклімату приміщень;
- обладнання, необхідні для функціонування приміщень;
- електричні розетки;
- предмети інтер'єру (наповнення);
- інформація про досяжність мереж;
- інформація про результати останніх перевірок систем та прибирань.

Перед початком генерації випадковим чином здійснюється вибір етапів, на яких буде реалізовано помилки. Для кожного етапу встановлено фіксований ліміт на кількість допустимих помилок, що дозволяє уникнути надмірної концентрації порушень у межах окремих типів об'єктів. Загальна кількість помилок налаштовується заздалегідь та у процесі генерації є сталою для всіх користувачів, що забезпечує однаковий рівень складності симуляції.

Після розподілу помилок між етапами розпочинається процес генерації приміщення. Для кожної категорії встановлюється загальна кількість екземплярів, що мають з'явитися у сцені. Для забезпечення унікальності створюваних віртуальних операційних блоків сценарій на кожному кроці ітерації випадковим чином обирає: кількість об'єктів поточного етапу, варіант кожної моделі з множини наявних для цього об'єкта, їхні координати, кут обертання та матеріал поверхні. У кожній групі (етапі) спочатку відбуваються помилкові реалізації унікальних об'єктів і цикл продовжується доки не буде створено необхідну кількість об'єктів в даній групі. За наявності кількох тегів порушення з них випадково вибирається один. Кожен вибір значення параметрів характеристик обмежується фіксованими в них правилами та вимогами. Генерація здійснюється за принципом умовної випадковості, з використанням попередньо заданих параметрів коректних та помилкових реалізацій.

Елементи обираються випадковим чином з доступного набору з перевіркою, чи вже використовувався цей елемент у попередніх ітераціях. Модель не може бути розміщена, якщо вибране місце вже зайняте іншим об'єктом. Це дозволяє уникнути перетинів та забезпечити реалістичність сцени. У разі невдалої спроби розміщення виконується повторна генерація. Помилкова реалізація можлива лише за умови, що об'єкт містить хоча б одну визначену помилкову варіацію. У разі успішної генерації такої реалізації фіксуються назва моделі та причина порушення.

Застосовується координатне розташування об'єктів задля забезпечення положення кожної моделі повністю в межах обраної кімнати, обмеженої внутрішніми поверхнями стін, та прилягання до стін, підлоги або стелі.

Розроблений сценарій генерації забезпечує створення приміщень із високою варіативністю результатів при фіксованій кількості помилок. Якщо ця

кількість дорівнює нулю, система формує варіант операційного блоку, який повністю відповідає гігієнічним вимогам. Згідно мети роботи, помилкові реалізації генеруватимуться лише серед специфічних об'єктів та їх параметрів, до яких передбачені вимоги щодо охорони праці в операційних блоках.

Взаємодія з користувачем

Після завершення генерації користувач потрапляє у створене віртуальне середовище. У цьому режимі він може вільно оглядати інтер'єр, пересуватись між приміщеннями та змінювати напрям погляду. Починаючи з початкової позиції, користувач досліджує приміщення з метою гігієнічної оцінки.

Під час взаємодії користувача з віртуальним середовищем, натискання на модель об'єкта призводить до її вибору. На екрані з'являється інформаційне вікно з коротким описом обраного елемента та переліком варіантів відповідей. Ці варіанти становлять список можливих порушень, визначених у вимогах для відповідного типу об'єкта. Користувач може обрати одну з відповідей або в будь-який момент закрити це вікно без відповіді. При наведенні на об'єкт, що може бути відміченим як помилковий, та затримці на ньому понад однієї секунди у центрі екрану з'являтиметься невелике коло, що спонукатиме користувача до дії.

Користувач має постійний доступ до меню, за допомогою якого можна повторно згенерувати нове приміщення або завершити огляд поточного приміщення операційного блоку. Останнє призведе до переходу на окремий екран розрахунку результатів, де його зароблені умовні бали перерахуються та відображатимуться за 100-бальною шкалою. За кожний відмічений варіант відповіді, що збігається з одним із записів в переліку проблем, він отримає один умовний бал. За кожен помилкову відповідь він втрачатиме 1 бал. У результаті він може отримати умовну кількість балів у інтервалі від 0 до кількості згенерованих помилок.

Програмна реалізація симулятора

Програмну реалізацію системи виконано за допомогою тривимірного рушія Unity, що було зумовлено його технічними перевагами та широкими можливостями для міжплатформеного розгортання. Unity забезпечує повноцінну підтримку тривимірної графіки, включаючи імпорт моделей, роботу з матеріалами, освітленням, колізіями та анімацією. Ключовою перевагою є можливість реалізації інтерактивної взаємодії з користувачем, вільної навігації у віртуальному середовищі та складної логіки опитування та оцінки дій. Unity має зручну інфраструктуру подій, UI-систему, систему фізики та підтримку сценаріїв на C#, що дозволяє ефективно реалізувати логіку генерації, обробки помилок і збирання відповідей.

У проєкті середовища Unity створені 3D-моделі додаються до директорії Assets та стають доступними як ресурси – ігрові об'єкти. Кожен об'єкт в Unity, окрім імені, містить дані про призначений матеріал, сітку (mesh), шейдер,

рендерер та інші компоненти, що визначають його вигляд і поведінку у сцені. Крім того платформа Unity дозволяє додавати власно створені компоненти, що здатні не тільки зберігати дані, але й керувати логікою об'єкта. Завдяки додаванню такого програмного сценарію до об'єкта стає можливим керувати його властивостями, обробкою подій, взаємодією з іншими об'єктами сцени та реалізацією складної поведінки у симуляції.

Сценарій генерації віртуальних приміщень реалізовано за допомогою програмних компонентів Spawn (відповідає за генерацію об'єктів) та ObjectData (зберігає дані про об'єкт). Компонент ObjectData прикріплюється до кожного об'єкта, що може бути розміщений у сцені. Він містить структуровану інформацію про об'єкт: перелік допустимих матеріалів, доступні геометричні варіації, допустимі координати розміщення, а також список тегів із причинами можливих порушень згідно з нормативними вимогами. Завдяки цьому кожне найменування може мати власний набір параметрів і обмежень, що зберігаються незалежно від інших об'єктів.

Unity дозволяє зручно керувати параметрами компонентів безпосередньо у вікні редактора. Достатньо перетягнути префаб (об'єкт зі всіма заданими компонентами) з папки Assets до відповідного масиву в інспекторі, і він автоматично буде доданий. Логічні змінні тегів-порушень відображаються у вигляді чекбоксів, що полегшує їх налаштування. Перелік можливих причин порушень визначено на основі формалізованих вимог і включає: текстуру, тип моделі, розташування, кількість, відсутність, наявність, дійсність, температуру, тиск і вологість. Доступні варіанти розташування об'єктів задаються як списки, де кожен елемент містить координати початку та кінця дозволеної зони для генерації.

Також редактор відображає направляючі, що показують початок та кінець коректних та помилкових місць генерації цього об'єкту зеленим та червоним кольором відповідно. Ними можна керувати прямо у вікні редагування (рис. 1). Відображення таких направляючих можна вимкнути у налаштуваннях об'єкту.

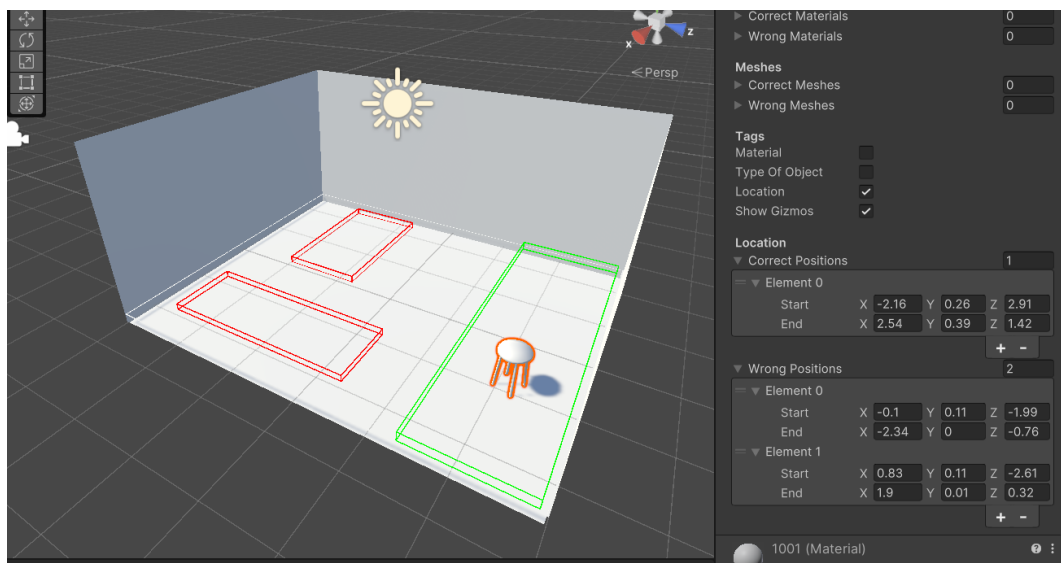


Рисунок 1 – Редагування варіантів коректного та некоректного розташування обраного об'єкта з вікна редагування

Розроблений компонент для додавання даних до об'єктів є універсальним засобом підготовки всіх моделей, необхідних для створення приміщень операційного блоку. Безпосередню генерацію приміщення реалізовано через сценарій `Spawn`, який додається до порожнього об'єкта, що позначає розташування відповідного приміщення. Компонент зберігає кількість помилок, які мають бути згенеровані, дозволяє змінювати це значення та наповнювати масиви об'єктів згідно з етапами (групами) генерації.

Для зберігання інформації про етап створено спеціальний клас групи, що містить, назву, необхідну кількість моделей для генерації, їх перелік, максимально допустиму кількість створених порушень та поточну кількість некоректних реалізацій всередині етапу. Перелік доступних моделей прирівнюється до відповідного масиву об'єктів, доданих у вікні редагування. До запуску значення поточної кількості помилок дорівнює нулю, інші значення додано програмно згідно формалізованих вимог. Зі створених груп всередині сценарію формується перелік етапів для генерації.

Після запуску системи спершу виконується розподіл помилок між етапами. Для цього використовується цикл `while`, який випадковим чином обирає етап доти, доки кількість помилок, що залишились до генерації, більша за нуль. Якщо поточна кількість помилок у вибраній групі менша за її допустимий максимум, значення коригуються: у групу додається одна помилка, а залишок зменшується.

Функція генерації проходить по кожній групі у визначеному порядку етапів. У кожній групі ітерації тривають, поки не буде досягнуто потрібної кількості реалізованих моделей. Насамперед генеруються помилкові реалізації.

Створюється список індексів, що відповідають об'єктам у масиві групи. Він потрібен для запобігання повторному вибору одного й того самого елемента. Поки список не порожній, обирається випадковий індекс, і за допомогою `GetComponent()` отримується об'єкт із відповідним компонентом `ObjectData`. Якщо поточна кількість помилок групи більша за нуль, а об'єкт має хоча б один тег порушення, випадково обирається один з доступних для нього тегів. Після цього індекс об'єкта видаляється зі списку.

Далі формується набір значень, необхідних для генерації, відповідно до обраного тегу помилки. Для вибраного тегу порушення значення параметра обирається з масиву помилкових варіацій, для інших – з коректних. Координати розташування визначаються як випадкова точка в межах дозволеного діапазону. Після цього модель створюється за допомогою `Instantiate()`, а її назва та обраний тег порушення додаються до списку помилкових реалізацій. Поточна кількість помилок у групі збільшується на одиницю. Якщо для об'єкта не передбачено помилкової реалізації, обирається випадковий варіант з переліку коректних.

Сценарій забезпечує генерацію серії моделей у межах заданого приміщення. Додавши його як компонент до порожнього об'єкта сцени та налаштувавши параметри, можна створити будь-яке приміщення операційного блоку згідно з визначеними вимогами.

Результати роботи

У результаті роботи було розроблено автоматизовану систему генерації випадкових наборів тривимірних моделей відповідно до фіксованих вимог. Варіативність отриманих приміщень досягається шляхом випадкового вибору мещу, матеріалу та розташування з наперед визначених списків допустимих варіантів для кожного об'єкта. Для матеріалів також застосовується випадкове задання кольору в межах заданого діапазону. Приклади згенерованих приміщень наведено на рисунку 2.



Рисунок 2 – Результати роботи сценаріїв генерації на прикладі операційної кімнати

Реалізовано також режим огляду моделі (рис. 3). У ньому користувач має змогу керувати власним розташуванням всередині моделі та кутом повороту за допомогою вводу з клавіатури та рухом миші. Об'єкт гравця містить компонент Unity CharacterController та камеру, що передає зображення віртуального приміщення на екран монітора користувача.



Рисунок 3 – Модель приміщення (зліва) та його огляд під час симуляції (праворуч)

Формою зворотного зв'язку від системи слугують механізм зіткнень. Алгоритм постійно проводить перевірки щодо зіткнення об'єкту користувача з межами наявних в сцені моделей аби унеможливити прохід гравця крізь них. Таке обмеження у русі покращує досвід користування та реалістичності, адже створює відчуття фізичної присутності.

Висновки

У ході роботи було реалізовано тривимірний симулятор операційного блоку, що поєднує автоматизовану генерацію просторових моделей з контрольованим відтворенням порушень гігієнічних нормативів. Проведена формалізація вимог нормативної документації дозволила створити логічну структуру генерації об'єктів та закласти основу для масштабованого сценарного моделювання.

Система забезпечує варіативність створюваних приміщень завдяки використанню випадкових значень параметрів моделей у межах допустимих нормативів. Водночас реалізовано механізм інтеграції помилкових реалізацій, що дає змогу формувати навчальні ситуації для перевірки знань з гігієни.

Запропонований підхід до створення моделей приміщень передбачає можливість додавання до кожного етапу генерації як коректних, так і помилкових варіантів реалізації об'єктів. Такий механізм забезпечує гнучке розширення варіативності створюваних сцен без необхідності суттєвих змін у структурі або логіці програмного коду. Це дозволяє швидко оновлювати симулятор у разі змін нормативної бази або розширення сценаріїв навчання.

Використаний тривимірний рушій підтримує експорт проєкту на різні платформи (Windows, Linux, WebGL, мобільні пристрої), що дає змогу масштабувати систему та використовувати її у навчальних закладах із різним технічним забезпеченням.

Функціональність симулятора охоплює повний цикл навчальної взаємодії: генерацію моделей, огляд, фіксацію відповідей, оцінювання результатів. Отримана система є ефективним інструментом для інтерактивного навчання в межах освітнього компонента «Гігієна та екологія» та може бути адаптована для інших типів спеціалізованих приміщень.

Список літератури.

1. Pottle, J. (2019). Virtual reality and the transformation of medical education. *Future Healthcare Journal*, 6(3), 181-185. <https://doi.org/10.7861/fhj.2019-0036>.
2. Zhao, G., Fan, M., Yuan, Z., et al. (2021). The comparison of teaching efficiency between virtual reality and traditional education in medical education: A systematic review and meta-analysis. *Annals of Translational Medicine*, 9(3), 252. <https://doi.org/10.21037/atm-20-5997>.
3. Kyaw, B. M., Saxena, N., Posadzki, P., et al. (2019). Virtual reality for health professions education: Systematic review and meta-analysis by the Digital Health Education Collaboration. *Journal of Medical Internet Research*, 21(1), e12959. <https://doi.org/10.2196/12959>.
4. Bardov, V.H., Omelchuk, S.T., Yavorovsky, O.P., та ін. (2017). Гігієна та екологія: Підручник для студентів вищих медичних навчальних закладів IV рівня акредитації. Нова Книга.

5. World Health Organization. (n.d.). Environmental health. <https://www.who.int/health-topics/environmental-health>.
6. Cook, D.A., Hatala, R., Brydges, R., et al. (2011). Technology-enhanced simulation for health professions education: A systematic review and meta-analysis. *JAMA*, 306(9), 978-988. <https://doi.org/10.1001/jama.2011.1234>.
7. Moro, C., Štromberga, Z., Raikos, A., & Stirling, A. (2017). The effectiveness of virtual and augmented reality in health sciences and medical anatomy. *Anatomical Sciences Education*, 10(6), 549-559. <https://doi.org/10.1002/ase.1696>.
8. Freina, L., & Ott, M. (2015). A literature review on immersive virtual reality in education: State of the art and perspectives. *Proceedings of eLearning and Software for Education (eLSE)*, 1-8. <https://doi.org/10.12753/2066-026X-15-00>.
9. McGaghie, W.C., Issenberg, S.B., Petrusa, E.R., & Scalese, R.J. (2010). A critical review of simulation-based medical education research: 2003-2009. *Medical Education*, 44(1), 50-63. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2923.2009.03547.x>.
10. Radianti, J., Majchrzak, T.A., Fromm, J., & Wohlgenannt, I. (2020). A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda. *Computers & Education*, 147, 103778. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103778>.
11. Ferrer-Torregrosa, J., Torralba, J., Jimenez, M. A., García, S., & Barcia, J.M. (2015). AR-BOOK: Development and assessment of a tool based on augmented reality for anatomy. *Journal of Science Education and Technology*, 24(1), 119-124. <https://doi.org/10.1007/s10956-014-9526-4>.
12. Clay, V., König, A., & Ropinski, T. (2019). Towards virtual reality chemical safety training. *Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. (p. 884-885). <https://doi.org/10.1109/VR.2019.8797868>.
13. Smith, S., Ericson, E., Quillin, J., et al. (2021). Virtual reality simulation in safety and clinical skills training for health professional students: A scoping review. *Nurse Education Today*, 105, 105044. <https://doi.org/10.1016/j.nedt.2021.105044>.
14. Bracq, M.S., Michinov, E., & Jannin, P. (2019). Virtual reality simulation in nontechnical skills training for healthcare professionals: A systematic review. *Simulation in Healthcare*, 14(3), 188-194. <https://doi.org/10.1097/SIH.0000000000000347>.
15. Antoniou, P.E., Arfaras, G., Pandria, N., et al. (2020). Augmented reality, virtual reality, and mixed reality in education: A systematic review of the literature. *Education Sciences*, 10(10), 283. <https://doi.org/10.3390/educsci10100283>.
16. Міністерство розвитку громад та територій України. (2022). ДБН В.2.2-10:2022. Будівлі і споруди. Заклади охорони здоров'я. Київ: Мінрегіон. <https://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2022/12/dbn-v.2.2-10-2022.pdf>.
17. Міністерство охорони здоров'я України. (2012). Державні санітарні норми і правила влаштування, обладнання та експлуатації закладів охорони здоров'я (ДСанПіН 2.2.3.4-2012). Київ: МОЗ.
18. Міністерство охорони здоров'я України. (2023). Наказ № 562 від 02.03.2023 «Про затвердження Санітарно-протиепідемічних вимог до новозбудованих, реконструйованих та реставрованих закладів охорони здоров'я». Офіційний вебсайт Верховної Ради України. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0562-23>.
19. Міністерство охорони здоров'я України. (2023). Наказ № 439 від 07.03.2023 «Про внесення змін до наказів МОЗ України від 31.10.2011 № 739 та від 11.04.2005 № 158». Офіційний портал Верховної Ради України. <https://zakon.rada.gov.ua/go/v0439282-23>.
20. Ліхніна, Р.В. (2024). Про задачу розробки електронного комплексу зі створення наборів тривимірних моделей спеціального призначення. *Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті*. Т. 6. (с. 940-941).