

Д.А. Миргородський, Т.В. Селівьорстова

## ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ ЗА ДОПОМОГОЮ UNREAL ENGINE 5

*Анотація.* У статті розглядаються особливості моделювання сталеплавильних процесів у реальному часі за допомогою Unreal Engine 5. Аналізується доцільність використання віртуальних симуляцій та інтерактивних технологій для візуалізації та оптимізації технологічних процесів машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ). Описано підхід до створення 3D-моделей обладнання, впровадження фізичних симуляцій процесів охолодження та твердіння сталі, а також інтеграції гейміфікованих навчальних сценаріїв у VR-середовищі. Визначено переваги використання реалістичних графічних рушіїв для навчання та підготовки спеціалістів у металургійній галузі.

*Ключові слова:* Unreal Engine 5, моделювання, сталеплавильні процеси, віртуальна реальність, МБЛЗ, симуляція в реальному часі, гейміфікація.

**Вступ.** Сучасна металургійна промисловість вимагає високого рівня підготовки фахівців, здатних працювати з автоматизованими системами та складними технологічними процесами, зокрема з машинами безперервного лиття заготовок (МБЛЗ). Традиційні методи навчання, які базуються на теоретичних знаннях і лабораторних роботах, часто є недостатньо ефективними для формування практичних навичок роботи в реальному виробничому середовищі.

Розвиток технологій віртуальної та доповненої реальності (VR/AR), а також використання ігрових рушіїв, таких як Unreal Engine 5, відкривають нові можливості для інтерактивного навчання. Використання графічних інтерактивних ігрових додатків у навчальному процесі дозволяє:

- Моделювати складні технологічні процеси без ризику пошкодження обладнання чи загрози безпеці студентів.
- Створювати реалістичні сценарії виробничих завдань, що сприяють розвитку критичного мислення та вміння приймати рішення.
- Підвищити мотивацію студентів через використання гейміфікації та інтерактивних механік навчання.
- Забезпечити доступ до навчальних матеріалів у будь-який час через інтеграцію з онлайн-платформами та VR-симуляторами.

Крім того, застосування таких технологій дозволяє скоротити витрати на навчання, оскільки зменшується потреба у використанні реального обладнання для початкової підготовки. У контексті цифрової трансформації освіти, розробка і впровадження ін-

теракивних симуляторів є стратегічно важливим напрямком, що сприяє підготовці висококваліфікованих кадрів для металургійної галузі.

Таким чином, дослідження особливостей розробки графічного інтерактивного ігрового додатку для ознайомлення з технологією МБЛЗ є актуальним як з точки зору освіти, так і для підвищення ефективності виробничих процесів у промисловості.

Мета роботи – розробка графічного інтерактивного ігрового додатку для візуалізації та вивчення технологічного процесу машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) з метою покращення підготовки фахівців у металургійній галузі та підвищення ефективності освітнього процесу.

**Огляд існуючих підходів до візуалізації технологічних процесів.** Візуалізація технологічних процесів відіграє важливу роль у навчанні та професійній підготовці спеціалістів у різних галузях промисловості. Вона дозволяє студентам та інженерам краще розуміти складні технічні процеси, підвищує ефективність навчання та мінімізує ризики помилок у реальних виробничих умовах.

Існує кілька основних підходів до візуалізації технологічних процесів, які використовуються у навчальних програмах та промислових симуляціях (таблиця 1).

Таблиця 1

Методи візуалізації технологічних процесів:

| Метод візуалізації        | Опис   | Переваги   | Недоліки   | Приклади використання                                 |
|---------------------------|--|--|--|---|
| Статичні схеми та графіки | Діаграми, креслення, схеми, що пояснюють процеси.                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Простота реалізації</li> <li>✓ Висока доступність</li> </ul>                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Відсутність інтерактивності</li> <li>- Низька реалістичність</li> </ul>                             | Навчальні посібники, технічна документація            |
| Відео та анімації         | Відеозаписи або комп'ютерні анімовані моделі технологічних процесів. | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Наглядність</li> <li>✓ Динамічне відображення процесу</li> </ul>                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Відсутність інтерактивності</li> <li>- Неможливість змінювати параметри в реальному часі</li> </ul> | Освітні відео, тренінги для працівників               |
| 2D-графічні симуляції     | Візуалізація процесів у вигляді двовимірних моделей та схем.         | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Відносно легка розробка</li> <li>✓ Може використовуватися у веб-додатках</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Низька деталізація</li> <li>- Менш ефективне занурення</li> </ul>                                   | Інтерактивні навчальні платформи, технічні симулятори |
| 3D-модельовання           | Реалістичні 3D-моделі технологічного обладнання та процесів.         | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Висока наочність</li> <li>✓ Можливість масштабування та деталізації</li> </ul>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Обмежена інтерактивність</li> <li>- Високі вимоги до апаратного забезпе-</li> </ul>                 | AutoCAD, SolidWorks, Simulink                         |

|                                      |   |   |   |   |
|--------------------------------------|---|---|---|---|
|                                      |   |   | чення   |   |
| VR-симуляції (віртуальна реальність) | Повне занурення у віртуальне середовище для навчання та тренувань.                      | ✓ Висока реалістичність<br>✓ Інтерактивність та моделювання сценаріїв                 | - Вимагає потужного обладнання<br>- Висока вартість розробки                            | Unreal Engine, Unity, OpenVR                        |
| AR-симуляції (доповнена реальність)  | Накладення цифрової інформації на реальний світ через мобільні пристрої або окуляри AR. | ✓ Динамічний інтерактивний досвід<br>✓ Можливість використання на мобільних пристроях | - Обмежене поле зору<br>- Не завжди точно передає фізичні процеси                       | AR-програми для навчання, промислові AR-інструменти |
| Гейміфіковані навчальні симулятори   | Інтерактивні ігрові моделі технологічних процесів із можливістю управління параметрами. | ✓ Висока залученість<br>✓ Можливість відпрацювання навичок у безпечному середовищі    | - Високі витрати на розробку<br>- Потребує глибокої інтеграції з навчальними програмами | Виробничі тренажери, навчальні VR-ігри              |

Сучасні методи візуалізації технологічних процесів значно відрізняються за рівнем реалістичності, інтерактивності та складності розробки. У традиційних підходах, таких як статичні схеми та відеоматеріали, основний акцент робиться на доступність та простоту використання, проте вони не забезпечують можливості інтерактивної взаємодії та змінних сценаріїв.

Більш просунуті методи, зокрема 3D-моделювання та цифрові симуляції, дозволяють створювати детальні візуальні представлення процесів, проте вимагають спеціалізованого програмного забезпечення та можуть бути обмежені у взаємодії з користувачем.

Найбільш реалістичні та ефективні підходи, такі як VR/AR-симуляції та гейміфіковані навчальні додатки, забезпечують повне занурення у віртуальне середовище, дозволяючи моделювати складні технологічні процеси та взаємодіяти з ними в режимі реального часу. Проте ці методи потребують значних ресурсів для розробки та потужного апаратного забезпечення.

Таким чином, вибір підходу до візуалізації залежить від цілей навчання:

– Для базового ознайомлення з процесами – достатньо використання схем, відео та 2D-анімацій.

– Для більш глибокого вивчення та інтерактивного навчання – доцільно застосовувати 3D-моделі та цифрові симуляції.

– Для моделювання виробничих ситуацій та практичного відпрацювання навичок – найбільш ефективними є VR/AR-симуляції та гейміфіковані додатки.

У таблиці 2 наведено порівняльний аналіз основних методів візуалізації за ключовими параметрами.

Таблиця 2

Порівняльний аналіз підходів до візуалізації

| Підхід                   | Реалістичність | Інтерактивність | Складність розробки | Доступність                   |
|--------------------------|----------------|-----------------|---------------------|-------------------------------|
| Статичні схеми           | Низька         | Відсутня        | Низька              | Висока                        |
| Відео та анімації        | Середня        | Відсутня        | Середня             | Висока                        |
| 2D/3D-моделювання        | Висока         | Обмежена        | Висока              | Середня                       |
| VR/AR-симуляції          | Дуже висока    | Висока          | Дуже висока         | Обмежена (вимагає обладнання) |
| Гейміфіковані симулятори | Дуже висока    | Висока          | Висока              | Середня                       |

Таким чином, традиційні методи (схеми, відео, 3D-моделювання) підходять для базового розуміння технологічних процесів, але не забезпечують повноцінної інтерактивності. VR/AR-симуляції та гейміфіковані додатки на основі Unreal Engine 5 дозволяють максимально наблизити навчальний процес до реальних виробничих умов. Оптимальний підхід – це поєднання інтерактивних VR-симуляцій з гейміфікацією, що дозволить ефективно навчати фахівців у сфері металургії та безпечного управління МБЛЗ.

**Огляд технологічного процесу МБЛЗ.** Машина безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) – це високотехнологічний комплекс обладнання, який використовується для перетворення рідкої сталі у затверділі заготовки (сляби, блюми, заготовки різних форм). Безперервне лиття сталі дозволяє підвищити ефективність виробництва, знизити втрати металу та покращити якість кінцевого продукту.

Слід зазначити, що процес безперервного лиття сталі є складною, багатоступеневою технологією, що включає виплавку, підготовку та затвердіння сталі. Використання МБЛЗ дозволяє суттєво знизити витрати, покращити якість заготовок та підвищити продуктивність виробництва.

Ключові особливості процесу:

- висока швидкість виробництва безперервним потоком,
- мінімізація дефектів за рахунок контрольованого охолодження,
- можливість швидкої зміни складу сталі завдяки вторинній металургії,
- економія матеріалів та зменшення відходів у порівнянні з традиційним розливом у форми.

Розуміння цих етапів є критично важливим для підготовки інженерів та операторів металургійного виробництва, а їх візуалізація у VR-середовищі дозволяє значно підвищити ефективність навчання та контролю якості процесу.

**Вибір технологічного стека для розробки додатку.** Розробка графічного інтерактивного ігрового додатку для ознайомлення з машиною безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) вимагає ретельного підбору технологічного стека (таблиця 3). Основними критеріями вибору є реалістичність графіки, інтерактивність, продуктивність, можливість роботи у VR-середовищі та легкість у масштабуванні.

Таблиця 3

Технологічний стек для розробки інтерактивного додатку

| Категорія                     | Технологія                   | Призначення  |
|-------------------------------|------------------------------|--|
| Ігровий рушій                 | Unreal Engine 5              | Розробка інтерактивного середовища, фізичних симуляцій, підтримка VR/AR    |
| 3D-модельовання               | Blender                      | Створення 3D-моделей обладнання та середовища                              |
|                               | Houdini                      | Процедурне модельовання фізичних ефектів (розплавлений метал, охолодження) |
| Фізичні симуляції             | Chaos Physics (UE5)          | Реалістична взаємодія твердих тіл та динамічних об'єктів                   |
|                               | Nvidia PhysX                 | Модельовання фізичних процесів   |
|                               | Niagara (UE5)                | Симуляція частинок (дим, розплавлений метал, охолодження)                  |
| VR/AR-інтеграція              | OpenXR                       | Кросплатформна підтримка VR/AR   |
|                               | SteamVR                      | Підтримка гарнітур VR (HTC Vive, Oculus, Valve Index)                      |
|                               | Oculus SDK                   | Оптимізація для пристроїв Meta Quest 2/Pro                                 |
| Програмування                 | Blueprints (UE5)             | Візуальне створення логіки додатку   |
|                               | C++ (UE5)                    | Реалізація складних фізичних симуляцій та обчислень                        |
| Користувацький інтерфейс (UI) | UMG (Unreal Motion Graphics) | Розробка графічного інтерфейсу користувача                                 |
|                               | Slate UI Framework           | Кастомізація UI та інтеграція складних інтерфейсних рішень                 |
| Аудіо                         | FMOD Studio                  | Інтеграція звуків, просторове аудіо  |
|                               | Unreal Audio Engine          | Вбудоване рішення для обробки звуку  |

Цей технологічний стек забезпечує реалістичну графіку, точне фізичне модельовання, підтримку VR/AR та ефективну інтерактивну взаємодію, що робить його оптимальним вибором для створення навчального симулятора процесу безперервного лиття сталі.

**Модельовання технологічного середовища.** Розробка інтерактивної 3D-моделі за допомогою платформи Unreal Engine дозволяє досягти найвищого рівня реалістич-

ності завдяки впровадженню сучасних технологій візуалізації. Серед них особливе місце займають Nanite та Lumen, які докорінно змінюють підхід до створення графіки та освітлення в ігровій та симуляційній індустрії.

Nanite – це інноваційна технологія, що дозволяє працювати з неоптимізованими 3D-активами без шкоди для продуктивності. Вона усуває необхідність створення низькополігональних моделей, карт нормалей та рівнів деталізації (LOD), зберігаючи при цьому кінематографічну якість зображення. Завдяки віртуалізованій геометрії та новим форматам сіток, Nanite підвищує продуктивність, забезпечуючи деталізацію на рівні пікселів та спрощуючи створення складних сцен.

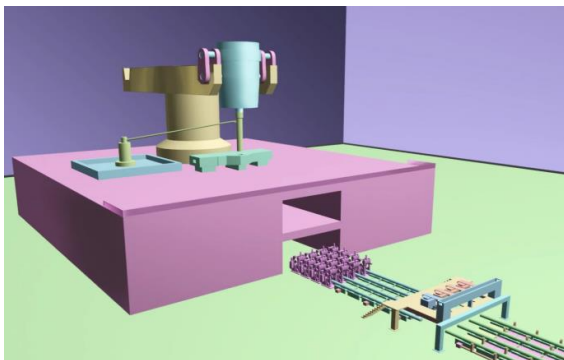
Lumen – це система динамічного глобального освітлення в реальному часі, яка імітує природну поведінку світла, враховуючи його відбиття від поверхонь. Вона створює реалістичне непряме освітлення та динамічні зміни умов освітлення. Система автоматично враховує інтенсивність джерел світла, перешкоди та їх вплив, забезпечуючи якісне освітлення у режимі реального часу.

Таким чином, інтеграція Nanite і Lumen в Unreal Engine 5 значно спрощує процес розробки, дозволяючи створювати вражаючі сцени з високою деталізацією та реалістичним освітленням, що відкриває нові можливості для інтерактивного дизайну та симуляцій [Помилка! Джерело посилання не знайдено.].

Головною метою розробки 3D-моделі МБЛЗ з інтеграцією до віртуального середовища UE5 є візуалізація промислових процесів або створення навчальних симуляцій. Визначившись із метою та об'єктом моделювання можемо поставити такі етапи розробки:

1. розробити деталізовану 3D-модель з необхідними деталями;
2. виконати текстурювання та UV-мапінгу кожного об'єкту;
3. оптимізувати кожний 3D об'єкт МБЛЗ для експорту в UE5;
4. інтегрувати готову модель в Unreal Engine 5 і налаштувати середовище;
5. оцінити результати та потенційну ефективність використання.

Моделювання технологічного середовища є одним із ключових етапів розробки інтерактивного додатку для візуалізації процесів машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ). Воно включає створення реалістичних 3D-моделей обладнання (рисунки 1, 2), налаштування фізичних симуляцій, а також розробку середовища взаємодії користувача з віртуальним простором.



(а)



(б)

Рисунок 1 – 3D-модель МБЛЗ, Blender 3D: а) без текстур, б) з текстурою

Вид сцени від першої особи показано на рисунку 2. Розробка графічного інтерактивного додатку на базі Unreal Engine 5 дозволяє створити реалістичну симуляцію процесу безперервного лиття сталі. Впровадження гейміфікації, VR-інтеграції та фізичних симуляцій забезпечує високу якість навчання та підвищує ефективність підготовки майбутніх фахівців у металургії.



Рисунок 2 – Вид від першої особи, анімація МБЛЗ

Інтерфейс користувача в Unreal Engine 5 також включає 2D-анімації та переходи між ними, що додають динамічності та наочності.

**Висновки.** У ході дослідження було розглянуто особливості моделювання сталеплавильних процесів у реальному часі з використанням Unreal Engine 5. Використання сучасних графічних технологій та віртуальної реальності у моделюванні технологічних процесів машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) дозволяє значно підвищити ефективність навчання та оптимізації виробничих процесів.

Основні результати роботи:

1) аналіз сучасних методів візуалізації – розглянуто підходи до комп'ютерного моделювання металургійних процесів та виявлено переваги використання віртуальних симуляторів у навчанні та промисловості.

2) розробка 3D-моделей МБЛЗ – створено реалістичні моделі основних компонентів обладнання, таких як кристалізатор, проміжний ковш, роликовий стан, система вторинного охолодження.

3) впровадження фізичних симуляцій – використано технології Chaos Physics та Niagara в Unreal Engine 5 для моделювання поведінки розплавленої сталі, затвердіння заготовки та впливу температурних режимів.

4) гейміфікація та інтерактивність – розроблено механізми взаємодії користувача з віртуальним середовищем через VR-інтерфейс та систему керування параметрами технологічного процесу.

5) оцінка ефективності – обґрунтовано переваги впровадження VR-симуляцій у навчальних програмах для підготовки фахівців у галузі металургії.

Отримані результати підтверджують, що використання Unreal Engine 5 для віртуального моделювання сталеплавильних процесів дозволяє покращити якість навчання, безпеку та точність аналізу виробничих параметрів. Використання VR- та інтерактивних симуляцій сприяє ефективній підготовці майбутніх спеціалістів у сфері металургії та може бути корисним для автоматизації контролю процесів безперервного лиття сталі.

#### ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Thomas, B. G. (2004). Continuous Casting. In McGraw-Hill Yearbook of Science and Technology (pp. 1-6). McGraw-Hill.
2. Thomas, B. G. (2002). Modeling of the continuous casting of steel—past, present, and future. Metallurgical and Materials Transactions B, 33(6), 795-812.
3. Jerald, J. (2015). The VR Book: Human-Centered Design for Virtual Reality. ACM Books.
4. Dede, C., Richards, J., & Saxberg, B. B. (2018). Digital Teaching Platforms: Customizing Classroom Learning for Each Student. Teachers College Press.
5. Epic Games. (2023). Unreal Engine 5 Documentation.
6. Shannon, T. (2022). Unreal Engine 5 for Beginners: A Comprehensive Guide to Game Development. Packt Publishing.

Received 20.12.2024.

Accepted 22.12.2024.

#### ***Features of real-time modeling of steelmaking processes using unreal engine 5***

*This paper explores the features of real-time modeling of steelmaking processes using Unreal Engine 5, focusing on the visualization and simulation of continuous casting machine (CCM) operations. The study highlights the advantages of interactive and virtual reality (VR) technologies in the training and optimization of metallurgical processes, providing a safer and more cost-effective alternative to traditional training methods.*

*A detailed approach to 3D modeling of CCM components is presented, including the tundish, mold, secondary cooling system, and roller sections, with a focus on their realistic visualization and optimization for real-time performance. The implementation of physical simulations using Chaos Physics and Niagara in Unreal Engine 5 allows for an accurate representation of molten steel flow, solidification dynamics, and temperature gradients. Additionally, gamification elements have been integrated to enhance user interaction, enabling students and engineers to explore various operational parameters in a controlled virtual environment.*

*The research also assesses the efficiency of digital simulation techniques compared to conventional learning methods in metallurgical training programs. The use of VR-based interactive learning modules improves engagement and comprehension by allowing users to manipulate casting parameters and observe the impact on the final product in real-time. The paper concludes that Unreal Engine 5 provides an effective platform for modeling complex*



*industrial processes, offering high-quality visual representation, dynamic interaction, and immersive training experiences for metallurgical professionals.*

*Future work will focus on enhancing AI-driven adaptive learning, expanding the simulation scope to include additional steelmaking stages, and integrating augmented reality (AR) tools to bridge the gap between virtual training and real-world applications.*

*Keywords: Unreal Engine 5, modeling, steelmaking processes, virtual reality, continuous casting machine (CCM), real-time simulation, gamification, interactive training, metallurgical process optimization.*

**Миргородський Данило Артемович** – студент кафедри інформаційних технологій і систем, факультет прикладних комп'ютерних технологій, Український державний університет науки і технологій.

**Селівьорстова Тетяна Віталіївна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій і систем, факультет прикладних комп'ютерних технологій, Український державний університет науки і технологій.

**Myrhorodskyi Danylo** – student of the Department of Information Technologies and Systems, Faculty of Applied Computer Technologies, Ukrainian State University of Science and Technology.

**Selivorstova Tatyana** – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor department of Information Technologies and Systems, Faculty of Applied Computer Technologies at Ukrainian State University of Science and Technologies.