

УДК 62-1:007.52:621.928

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-9>

ІНТЕГРАЦІЯ САПР ІЗ ТЕХНОЛОГІЯМИ 3D-ДРУКУ ДЛЯ ПРИСКОРЕННЯ ІНЖЕНЕРНОГО ПРОТОТИПУВАННЯ

Гурковська Світлана Сергіївна,

кандидат технічних наук,

доцент кафедри цифрових технологій та проєктно-аналітичних рішень

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0001-6594-6815

У статті розглянуто актуальні аспекти інтеграції систем автоматизованого проєктування (САПР) із технологіями тривимірної друку для прискорення процесів інженерного прототипування у сфері прикладної механіки. З огляду на глобальну цифрову трансформацію виробничих процесів особливо актуальним стає поєднання можливостей САПР-систем з адитивними технологіями, що відкриває нові підходи до створення, аналізу та вдосконалення інженерних рішень.

Метою дослідження є аналіз інструментальних засобів і методик, які дозволяють ефективно поєднувати САПР-моделювання та 3D-друк для швидкого виготовлення функціональних прототипів механічних деталей. У роботі проведено огляд і порівняльний аналіз трьох популярних САПР-систем – SolidWorks, Autodesk Fusion 360 та PTC Creo – з урахуванням їхніх можливостей експорту моделей у форматі STL, 3MF, підготовки до 3D-друку, перевірки геометрії та інтеграції з адитивними технологіями. Дослідницька частина включала створення однакових цифрових моделей у різних програмних середовищах, їх конвертування та фізичне виготовлення за допомогою FDM-принтера. Аналіз проведених експериментів дозволив оцінити точність, якість друку, простоту підготовки та витрати часу на кожному етапі. Було встановлено, що використання FDM-принтерів із PLA-пластиком забезпечує оптимальний баланс між вартістю та якістю під час виготовлення дослідних зразків.

Результати підтверджують, що інтеграція САПР і 3D-друку значно скорочує інженерний цикл проєктування, підвищує ефективність тестування та вдосконалення конструктивних рішень. Особливу увагу приділено освітньому потенціалу цієї технології: створення фізичних моделей із цифрових проєктів сприяє формуванню просторового мислення студентів, їх оволодінню навичками цифрового виробництва та розвитку критичного мислення, що відповідає вимогам сучасної інженерної освіти і ринку праці.

Ключові слова: САПР, 3D-друк, інженерне прототипування, прикладна механіка, адитивні технології, цифрове моделювання.

Hurkovska Svitlana. Integrating CAD with 3D printing technologies to accelerate engineering prototyping

This article explores the current aspects of integrating Computer-Aided Design (CAD) systems with three-dimensional (3D) printing technologies to accelerate engineering prototyping processes in the field of applied mechanics. In the context of the global digital transformation of manufacturing, the combination of CAD capabilities with additive manufacturing technologies is becoming increasingly relevant, offering new approaches to the creation, analysis, and refinement of engineering solutions.

The aim of this study is to analyze tools and methodologies that enable the effective combination of CAD modeling and 3D printing for the rapid fabrication of functional prototypes of mechanical components. The paper presents a comparative analysis of three widely used CAD systems – SolidWorks, Autodesk Fusion 360, and PTC Creo – considering their ability to export models in STL and 3MF formats, prepare them for 3D printing, verify geometry, and integrate with additive technologies. The research involved creating identical digital models across the different CAD platforms, converting them, and fabricating them using an FDM printer. The experimental analysis evaluated the accuracy, print quality, ease of preparation, and time requirements at each stage. It was found that using FDM printers with PLA filament provides an optimal balance between cost and quality in prototype manufacturing.

The results confirm that the integration of CAD and 3D printing significantly shortens the engineering design cycle, enhances the efficiency of design testing, and supports iterative improvements in early development stages. Special attention is given to the educational potential of this technology: transforming digital projects into tangible models helps students develop spatial reasoning, master digital fabrication skills, and foster critical thinking – meeting the demands of modern engineering education and the labor market.

Keywords: CAD, 3D printing, engineering prototyping, applied mechanics, additive technologies, digital modeling.

Вступ. У сучасному інженерному середовищі зростає потреба в оперативному створенні та тестуванні нових технічних рішень. Процес проєктування стає дедалі складнішим через

підвищені вимоги до функціональності, точності й економічної ефективності виробів. Одним із ключових інструментів для розв'язання цих задач є інтеграція систем автоматизованого

проектування (САПР) із технологіями тривимірного друку.

Поєднання цифрового моделювання з адитивними технологіями дозволяє значно скоротити час від ідеї до створення фізичного прототипу. Такий підхід забезпечує можливість швидкої ітерації, виявлення та усунення помилок на ранніх етапах проектування, що критично важливо для інноваційного машинобудування та прикладної механіки. Крім того, інтеграція САПР і 3D-друку сприяє персоналізації виробництва, зменшенню витрат на виготовлення дослідних зразків, а також полегшує впровадження концепцій цифрового виробництва.

З огляду на ці переваги дослідження процесів ефективної інтеграції CAD-систем з адитивними технологіями є надзвичайно актуальним і відповідає сучасним тенденціям розвитку технічної освіти та промислового дизайну.

Метою дослідження є розроблення рекомендацій і аналіз ефективних підходів до інтеграції систем автоматизованого проектування (САПР) з технологіями 3D-друку для оптимізації процесу інженерного прототипування у сфері прикладної механіки.

Методи та методики дослідження. Для досягнення поставленої мети було застосовано теоретичні методи дослідження. На початковому етапі виконано аналіз наукової літератури та сучасних публікацій, присвячених САПР, адитивним технологіям і цифровому прототипуванню. Це дозволило визначити актуальні тренди, інструментальні засоби та методологічні основи інтеграції CAD-систем із 3D-друком.

У межах дослідження використовувались системний аналіз та порівняльна характеристика функціональних можливостей популярних програмних продуктів, як-от SolidWorks, Autodesk Fusion 360, PTC Creo. Було досліджено їх здатність до прямої підготовки моделей у форматах, придатних для 3D-друку (STL, 3MF), а також наявність інструментів для автоматичної перевірки моделей на наявність похибок.

Практична частина дослідження ґрунтувалась на експериментальному виготовленні інженерних прототипів механічних деталей, спроєктованих у CAD-середовищі. Для реалізації 3D-друку використовувалися пристрої FDM-типу із PLA-пластиком. Проводилось вимірювання геометричної точності отриманих моделей, аналіз складності підготовки до друку та часового ресурсу, необхідного для виготовлення.

Таким чином, дослідження спрямовано на вивчення питання інтеграції САПР із 3D-друком у контексті інженерного прототипування.

Результати. Згідно з результатами численних досліджень, адитивні технології стрімко трансформуються з допоміжного інструменту для прототипування в повноцінний компонент серійного виробництва. У роботі [1] підкреслено, що 3D-друк вийшов за межі експериментальних лабораторій і все ширше застосовується в промисловості, медицині, військовій техніці та освіті. Особливу увагу автор приділяє різноманітності методів адитивного виробництва та перспективам розвитку матеріалів, що значною мірою впливають на функціональність і точність друку.

У публікації [2] здійснено огляд новітніх досягнень у галузі 3D-друку в глобальному масштабі, зокрема у сферах протезування, архітектури, машинобудування, створення металевих деталей. Автор акцентує на необхідності активного впровадження цих технологій у вітчизняну промисловість та освітню систему для збереження конкурентоспроможності. Важливим аспектом дослідження є порівняння переваг і недоліків адитивних технологій у контексті їх використання поряд із традиційними методами виробництва.

Окрема увага в літературі приділяється питанням роботи з файлами у форматі STL, які є базовим середовищем передачі моделей із CAD-систем до 3D-принтерів. У статтях [4; 5] ґрунтовно розглянуто проблематику геометричної точності STL-сіток, типові помилки та методи їх виправлення. Зокрема, йдеться про автоматизовані способи виявлення перекриттів, ізольованих граней та неправильного орієнтування нормалей. Ці аспекти є критично важливими в інтеграції CAD-проектування з адитивним виготовленням, особливо в будівельній галузі.

Своєю чергою робота [5] підкреслює значущість САПР як складової частини сучасних інженерних процесів. Наведено широку характеристику математичного, програмного й технічного забезпечення таких систем, а також їх роль у цифровізації виробництва. Вказано, що автоматизоване проектування є основою інженерної діяльності, без якої неможливий розвиток конкурентоспроможних проєктів у XXI столітті.

Таким чином, аналіз літератури свідчить про високу динаміку розвитку обох технологічних напрямів – CAD і 3D-друку – та обґрунтовує актуальність їх інтеграції для оптимізації прототипування в прикладній механіці.

У межах цієї дослідницької роботи було проаналізовано три CAD-системи, що дозволяють виконувати 3D-моделювання, а саме SolidWorks, Autodesk Fusion 360, PTC Creo.

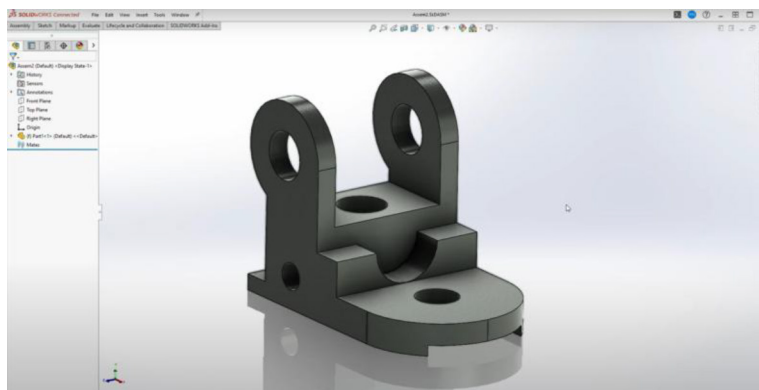


Рис. 1. Робочий простір SolidWorks

SolidWorks [6] є однією з найпопулярніших САПР-систем у машинобудівній галузі. Програма має потужні інструменти твердотілого 3D-моделювання, модулів для симуляції навантажень, аналізу руху, а також генерації технічної документації. SolidWorks підтримує прямий експорт у формат STL для 3D-друку, має вбудований перевірювач геометрії на наявність похибок і автоматичну генерацію підтримок. Система широко використовується в освітніх цілях і сумісна з більшістю 3D-принтерів через сторонні плагіни.

Fusion 360 [7] – це хмарна CAD/CAM/CAE-платформа від Autodesk, яка поєднує проєктування, моделювання, симуляцію і виготовлення в єдиному середовищі. Однією з ключових переваг Fusion 360 є нативна інтеграція з інструментами CAM та генеративного дизайну, а також підтримка збереження проєктів у хмарі. Для 3D-друку програма дозволяє автоматично підготувати модель до друку, перевірити її топологію, оптимізувати сітку і експортувати у формати STL, OBJ, 3MF. Має простий інтерфейс і добре підходить для швидкого прототипування.

PTC Creo [8] – це потужна платформа CAD/CAE класу high-end, орієнтована на промислове

застосування. Вона має широкі можливості параметричного моделювання, моделювання поверхонь, симуляцій та інтеграції з PLM-системами. Creo підтримує 3D-друк через спеціальні модулі, які дозволяють не лише експортувати STL, але й прямо керувати параметрами друку. Система також має вбудовані інструменти топологічної оптимізації та працює з високоточними сітками, однак потребує більше ресурсів і часу на навчання.

Для більш наглядного порівняльного аналізу основні характеристики було зведено в таблицю 1.

На основі проведеного порівняльного аналізу можна зробити висновок, що всі три розглянуті САПР-системи – SolidWorks, Autodesk Fusion 360 та PTC Creo – мають інструменти, які дозволяють ефективно інтегрувати процес моделювання з технологіями 3D-друку. Проте їх потенціал у сфері оптимізації інженерного прототипування суттєво відрізняється залежно від функціональних можливостей, складності освоєння та орієнтації на конкретні категорії користувачів.

Fusion 360 вирізняється своєю простотою, хмарною інфраструктурою та гнучкою

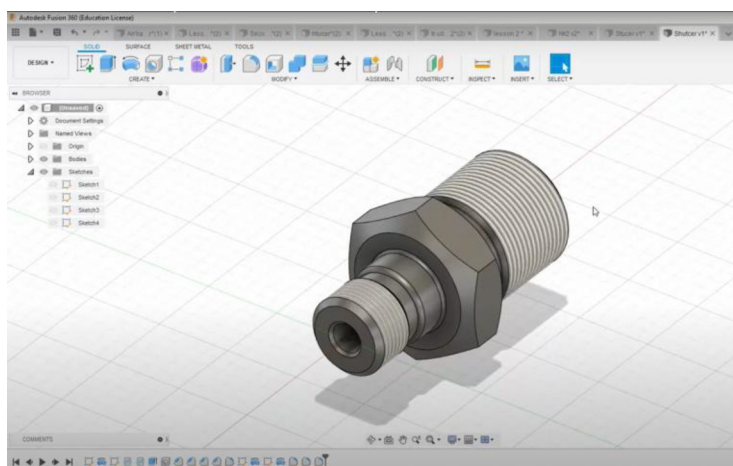


Рис. 2. Робочий простір Fusion 360

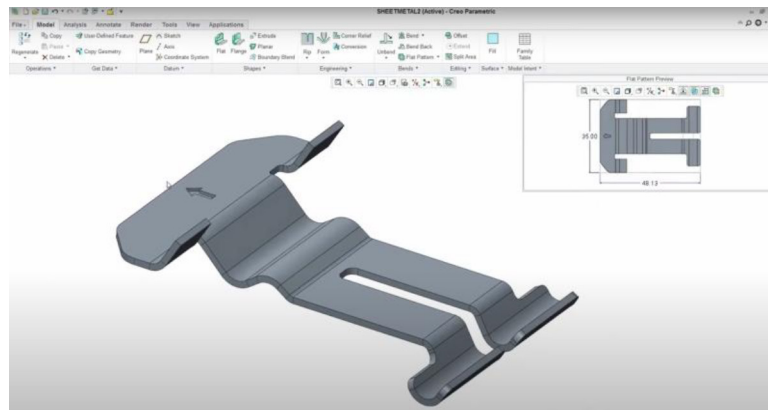


Рис. 3. Робочий простір PTC Creo

інтеграцію CAD/CAM/CAE в єдиному середовищі. Завдяки вбудованим модулям для генеративного дизайну та підготовки до 3D-друку він є оптимальним інструментом для швидкого прототипування в освітніх і стартап-проєктах.

SolidWorks забезпечує баланс між функціональністю та зручністю використання, що робить його зручним вибором для середовища навчання та малого виробництва. Його добре розвинуті модулі моделювання й надійна підтримка STL-експорту дозволяють швидко інтегруватися із широким спектром 3D-принтерів.

PTC Creo демонструє найвищу гнучкість і точність, але вимагає значних ресурсів і навичок. Він найкраще підходить для складних інженерних задач, коли необхідна висока точність, топологічна оптимізація та робота з промисловими прототипами.

Загалом, для цілей інженерного прототипування в прикладній механіці найбільш ефективною з позиції інтеграції, швидкості освоєння та практичного застосування в освітньому процесі є Autodesk Fusion 360, тоді як SolidWorks – універсальний компроміс, а Creo – інструмент для високотехнологічних рішень.

У ході дослідження також було проведено серію експериментальних робіт, спрямованих на вивчення ефективності інтеграції САПР і технологій 3D-друку в процесі створення інженерних прототипів. Основний акцент робився на оцінюванні швидкості реалізації конструктивної ідеї у фізичному виконанні, а також на якісних показниках виготовлених моделей.

Перший етап дослідження передбачав розроблення 3D-моделей механічних деталей (кришка) у трьох CAD-системах – SolidWorks (рис. 4), Fusion 360 і PTC Creo. Моделі були ідентичними за геометрією і призначенням. Далі проведено експортування моделей у формат STL (рис. 5), підготовка їх до друку (перевірка цілісності сітки, товщини стінок тощо) і друк на FDM-принтері з однаковими налаштуваннями друку для PLA-пластику (рис. 6).

Результати показали, що час повного циклу «моделювання – фізичний прототип» для кожної CAD-системи становив від 2 до 5 годин. Найменший час продемонстрував Fusion 360 завдяки автоматизованій оптимізації сітки та попередній перевірці моделі. SolidWorks показав стабільну якість та універсальність, тоді як

Таблиця 1

Можливості CAD-систем для адитивного виробництва

Характеристика	SolidWorks	Autodesk Fusion 360	PTC Creo
Тип моделювання	Твердотільне, поверхневе	Твердотільне, параметричне, сіткове	Параметричне, твердотільне, гібридне
Підтримка 3D-друку	Так (STL, 3MF, підтримка експорту)	Так (STL, OBJ, 3MF, автомат. підготовка)	Так (STL, параметри друку в CAD)
Перевірка моделі на похибки	Так	Так	Так
Генеративний дизайн	Обмежено через плагіни	Вбудовано	Так, але переважно в Pro версіях
CAM/CAE-функціонал	Інтеграція з SOLIDCAM	Вбудовано	Високорівнева інтеграція
Хмарна синхронізація	Обмежено (через PDM)	Так (повна інтеграція)	Частково (через Windchill)
Складність освоєння	Середня	Низька	Висока
Цільова аудиторія	Освіта, малий та середній бізнес	Освіта, стартапи, дизайн	Промислове застосування

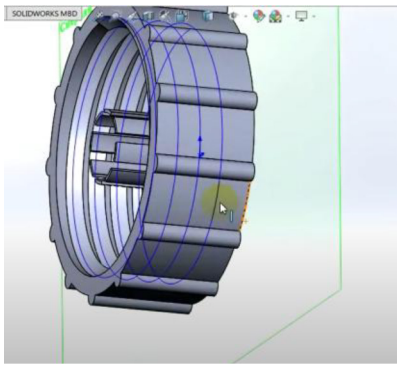


Рис. 4. Приклад збірної одиниці (корпус) в одній з CAD-систем

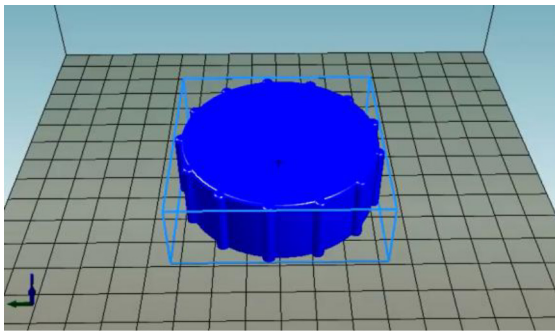


Рис. 5. Експортування моделі у формат STL

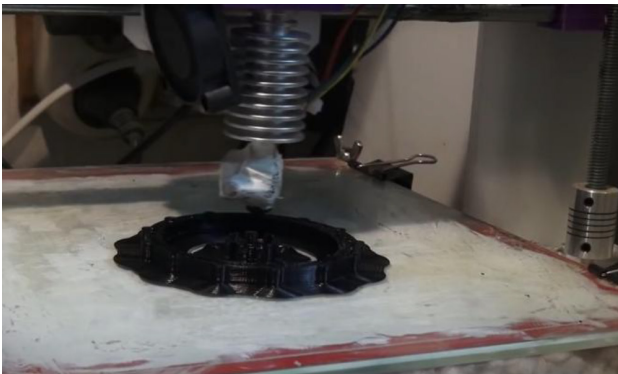


Рис. 6. Друк на FDM-принтері

Стео виявився найточнішим, але найскладнішим у підготовці моделей.

Таким чином, результати підтвердили, що інтеграція САПР і 3D-друку значно скорочує цикл виготовлення прототипів, забезпечує високий рівень наочності, підвищує ефективність освітнього процесу в інженерній освіті та сприяє швидкому тестуванню конструктивних рішень ще на етапі моделювання.

Висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено, що інтеграція систем автоматизованого проєктування (САПР) з технологіями тривимірного друку є ефективним інструментом для прискорення інженерного прототипування в галузі прикладної механіки. Аналіз функціональних можливостей сучасних CAD-систем (SolidWorks, Autodesk Fusion 360, PTC Creo) показав, що всі вони мають технічну здатність до формування коректних цифрових моделей, придатних для подальшого 3D-друку, однак відрізняються рівнем складності освоєння, гнучкістю інтерфейсу та інтеграційними можливостями.

Експериментальні дослідження продемонстрували, що використання адитивних технологій у поєднанні з CAD-моделюванням дозволяє скоротити час на створення дослідних зразків, а також оперативно вносити зміни в конструкцію на ранніх етапах розроблення. Крім того, такий підхід дозволяє знизити витрати на матеріали й виготовлення прототипів, а також підвищити ефективність освітнього процесу шляхом створення фізичних моделей студентами.

Надзвичайно важливою є освітня складова частина інтеграції САПР і 3D-друку, яка дозволяє майбутнім інженерам-механікам оволодіти сучасними цифровими технологіями проєктування та виготовлення, що відповідає вимогам сучасної технічної освіти.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Сучасний стан та перспективи розвитку адитивних технологій / О. Муравйов та ін. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2021. Т. 32 (71). Вип. № 5. С. 114–119. URL: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/18>
2. Гречко О. М. Сучасні адитивні технології та 3D-друк. Огляд останніх досягнень в різних сферах людського життя. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія : Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2019. № (1). С. 63–75. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2019.1.12>
3. Основи САПР в автомобілебудуванні : навч. посіб. / О. М. Артюх та ін. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. 168 с.
4. Гусев В. О., Нікіфорова Т. Д. Аналіз файлі у форматі STL як основа моделювання для 3D-друку будівельних об'єктів. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2024. Т. 2. № 20. С. 41–50. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.41.1041>
5. Гусев В., Нікіфорова Т. Д. Аналіз файлів формату STL як вхідних даних для систем швидкого прототипування. Будівельні конструкції. *Теорія і практика*. 2022. Т. 11. С. 77–85. URL: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.11.2022.77-85>.
6. SOLIDWORKS. [solidworks.com](https://www.solidworks.com/). URL: <https://www.solidworks.com/> (дата звернення: 17.06.2025).

7. Fusion 360 for personal use. autodesk.com. URL: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/personal> (дата звернення: 17.06.2025).

8. Creo CAD Software: Enable the Latest in Design. ptc.com. URL: <https://www.ptc.com/en/products/creo> (дата звернення: 17.06.2025).

REFERENCES:

1. Muraviov, O., et al. (2021). Suchasnyi stan ta perspektyvy rozvytku adytyvnykh tekhnolohii [Current state and prospects of additive technologies development]. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky – Scientific Notes of V. I. Vernadsky TNU. Series: Technical Sciences*, 32(71), no. 5, 114–119. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/18> [in Ukrainian].

2. Hrechko, O. M. (2019). Suchasni adytyvni tekhnolohii ta 3D-druk. Ohliad ostannikh dosiahnen v riznykh sferakh liudskoho zhyttia [Modern additive technologies and 3D printing. Review of recent achievements in various spheres of human life]. *Visnyk NTU “KhPI”. Serii: Problemy udoskonaliuvannia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka – Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Problems of Improving Electric Machines and Devices. Theory and Practice*, (1), 63–75. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2019.1.12> [in Ukrainian].

3. Artiukh, O. M., et al. (2021). OSNOVY SAPR V AVTOMOBILEBUDUVANNI: Navchalnyi posibnyk [Fundamentals of CAD in Automotive Engineering: Textbook]. Zaporizhzhia: NU “Zaporizka politekhnika” – National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, 168 p. [in Ukrainian].

4. Husiev, V. O., & Nikiforova, T. D. (2024). Analiz faili u formati STL yak osnova modeliuвання dla 3D-druku budivelnykh ob'ektiv [Analysis of STL files as a basis for modeling building objects for 3D printing]. *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury – Ukrainian Journal of Construction and Architecture*, 2(020), 41–50. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.41.1041> [in Ukrainian].

5. Husiev, V., & Nikiforova, T. D. (2022). Analiz failiv formatu STL yak vkhidnykh danykh dla system shvydkoho prototypuvannia [Analysis of STL files as input data for rapid prototyping systems]. *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka – Building Structures. Theory and Practice*, 11, 77–85. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.11.2022.77-85> [in Ukrainian].

6. SOLIDWORKS. solidworks.com. Retrieved from: <https://www.solidworks.com/> (accessed: 17.06.2025).

7. Fusion 360 for personal use. autodesk.com. Retrieved from: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/personal> (accessed: 17.06.2025).

8. Creo CAD Software: Enable the Latest in Design. ptc.com. Retrieved from: <https://www.ptc.com/en/products/creo> (accessed: 17.06.2025).