

**МІНІСТЕРСТВО ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ФАРМАЦЕВТИЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**факультет фармацевтичних технологій та менеджменту
кафедра промислової технології ліків та косметичних засобів**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему: «ЗАСТОСУВАННЯ 3D-ТЕХНОЛОГІЙ У ВИРОБНИЦТВІ
ЛІКАРСЬКИХ ЗАСОБІВ: АНАЛІЗ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА
ОЦІНКА МОЖЛИВОСТЕЙ ДЛЯ ФАРМАЦЕВТИЧНОЇ
ПРОМИСЛОВОСТІ»**

Виконав: здобувач вищої освіти групи
ТФПм19(5,5з)-02

спеціальності 226 Фармація, промислова фармація
освітньої програми Технології фармацевтичних
препаратів

Денис ГАРБАРЕНКО

Керівник: доцент закладу вищої освіти кафедри
промислової технології ліків та косметичних засобів,
к.фарм.н., доцент Дмитро СОЛДАТОВ

Рецензент: доцент закладу вищої освіти кафедри
аптечної технології ліків, к.фарм.н.,
доцент Володимир КОВАЛЬОВ

АНОТАЦІЯ

У роботі представлено результати дослідження застосування 3D-технологій у виробництві лікарських засобів. Проведено аналіз сучасного програмного забезпечення для тривимірного моделювання, визначено його можливості та обмеження у створенні прототипів лікарських форм. Дослідження охоплює основні методи 3D-друку, особливості налаштування параметрів друку та оцінку впливу цих параметрів на якість друкованих моделей.

Робота складається з наступних частин: вступ, огляд літератури, вибір методів дослідження, експериментальна частина, загальні висновки, перелік використаних літературних джерел, загальний обсяг роботи 46 сторінок, містить 9 таблиць, 32 джерела літератури.

Ключові слова: 3D-друк, лікарська форма, програмне забезпечення, фармацевтичні дослідження, персоналізація дозування

ANNOTATION

The thesis presents the results of research on the application of 3D technologies in the production of pharmaceuticals. The analysis of modern software for three-dimensional modeling was carried out, and its capabilities and limitations in creating prototypes of dosage forms were determined. The research covers the main 3D printing methods, features of printing parameter settings, and an assessment of the impact of these parameters on the quality of printed models.

The work consists of the following parts: introduction, literature review, choice of research methods, experimental part, general conclusions, list of used literature sources, total work volume of 46 pages, contains 9 tables, 32 literature sources.

Key words: 3D printing, dosage form, software, pharmaceutical research, personalized dosing.

ЗМІСТ

Вступ.....	5
Розділ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....	8
1.1. Сучасний стан досліджень у галузі 3D-друку у фармації.....	8
1.2. Лікування виразок ротової порожнини.....	10
1.3. Програмне забезпечення для 3D-моделювання лікарських форм.....	13
1.4. Вплив параметрів 3D-друку на якість лікарських форм.....	17
1.5. Переваги та обмеження 3D-друку у фармації.....	20
Висновки до розділу 1.....	23
Розділ 2. ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	24
2.1. Вибір загальної методології досліджень.....	24
2.2. Характеристика об'єктів дослідження.....	26
2.3 Характеристика методів дослідження.....	28
Висновки до розділу 1.....	30
Розділ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ 3D-МОДЕЛЮВАННЯ ЛІКАРСЬКИХ ФОРМ У ФАРМАЦЕВТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ.....	31
3.1. Аналіз даних щодо застосування програмного забезпечення у 3D- моделюванні лікарських форм.....	31
3.2. Порівняльний аналіз функціональних можливостей програмного забезпечення.....	33
3.3. Оцінка обмежень та перспектив застосування програмного забезпечення	35
3.4. Практичні рекомендації щодо вибору програмного забезпечення.....	40
3.5. Перспективи подальших досліджень у сфері застосування 3D-друку.....	42
Висновки до розділу 3.....	45
Висновки.....	46
Список використаних джерел.....	47

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

AI — Artificial Intelligence (штучний інтелект).

FDM — Fused Deposition Modeling (моделювання методом наплавлення розплавленого матеріалу).

GPU — Graphics Processing Unit (графічний процесор).

PLA — Polylactic Acid (полілактид, біорозкладний полімер).

PVA — Polyvinyl Alcohol (полівініловий спирт, водорозчинний полімер).

SLA — Stereolithography Apparatus (стереолітографія).

SLS — Selective Laser Sintering (селективне лазерне спікання).

Вступ

Актуальність теми.

Сучасний розвиток фармацевтичної промисловості вимагає впровадження новітніх технологій, які здатні зробити процес виробництва лікарських засобів більш гнучким, ефективним та економічно доцільним. Однією з найперспективніших інновацій є технологія 3D-друку, яка дозволяє створювати складні за формою та структурою лікарські препарати з чітко визначеними властивостями. Ця технологія відкриває нові можливості для персоналізованої медицини, що особливо важливо для пацієнтів із рідкісними захворюваннями або специфічними медичними потребами, для яких стандартні лікарські форми можуть бути неефективними.

Застосування 3D-друку дозволяє регулювати швидкість розчинення, вивільнення активної речовини та навіть поєднувати кілька діючих компонентів в одній лікарській формі. Крім того, ця технологія сприяє значному скороченню часу та витрат на розробку нових препаратів завдяки створенню прототипів із заданими характеристиками.

Однак інтеграція 3D-друку в промислові процеси потребує наявності надійного програмного забезпечення для проектування моделей лікарських форм і забезпечення стабільності процесу. Тому дослідження можливостей та обмежень такого програмного забезпечення є актуальним напрямом, що сприяє прискоренню впровадження новітніх технологій у практичну фармацію та підвищенню ефективності виробництва.

Мета дослідження - Проаналізувати можливості застосування програмного забезпечення для 3D-друку у виробництві лікарських засобів та оцінити потенційні перспективи цієї технології для впровадження у фармацевтичну промисловість.

Завдання дослідження:

1. Провести огляд сучасних наукових досліджень щодо використання 3D-друку у фармації.

2. Дослідити основні типи програмного забезпечення для 3D-моделювання лікарських форм.
3. Оцінити ключові параметри ефективності програм та їх відповідність фармацевтичним потребам.
4. Провести аналіз переваг та обмежень існуючих технологій 3D-друку.
5. Розробити рекомендації щодо використання програм для створення прототипів лікарських засобів.

Об'єкт дослідження:

Процес проектування та виробництва лікарських форм із застосуванням технології 3D-друку.

Предмет дослідження:

Програмне забезпечення для 3D-моделювання та створення лікарських форм, а також їх функціональні можливості у фармацевтичному виробництві.

Методи дослідження.

У дослідженні використовувались методи огляду наукової літератури, порівняльного аналізу програмного забезпечення та систематизації даних. Проведено аналіз літературних джерел і доступних програм для моделювання на базі відкритих платформ та аналітичних звітів про впровадження 3D-друку.

Практичне значення отриманих результатів:

Результати дослідження можуть бути використані для оптимізації процесів у фармацевтичних компаніях, що впроваджують технології 3D-друку. Вони сприятимуть скороченню часу на розробку лікарських форм та зниженню витрат на експерименти. Окрім того, дослідження дозволяє формувати обґрунтовані рекомендації для практичного використання програмного забезпечення та стандартизації процесу.

Елементи наукових досліджень (за наявності):

Проведено систематизацію програмного забезпечення за функціональними можливостями.

Оцінено відповідність функцій програм вимогам фармацевтичного виробництва.

Розроблено рекомендації для оптимального застосування 3D-друку у розробці лікарських форм.

Структура та обсяг кваліфікаційної роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, огляду літератури, експериментальної частини, загальних висновків, переліку використаних джерел, додатків, викладена на 46 сторінках, включає 9 таблиць, 32 джерела літератури.

Розділ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Сучасний стан досліджень у галузі 3D-друку у фармації

Технологія 3D-друку, або адитивного виробництва, бере свій початок із 1980-х років, коли був запатентований метод стереолітографії — процес, що дозволяв створювати тривимірні об'єкти шляхом затвердіння рідкого фотополімеру під дією ультрафіолетового променя. Згодом було розроблено інші методи, такі як FDM (fused deposition modeling) — друк методом пошарового нанесення розплавленого матеріалу та SLS (selective laser sintering) — лазерне спікання порошкових матеріалів. Спочатку 3D-друк використовувався переважно для створення прототипів у промисловості, але поступово його застосування розширилось і на медичну галузь [2, 15, 18].

Важливим кроком стало затвердження Управлінням з контролю за продуктами і ліками США (FDA) першого лікарського засобу, виготовленого за допомогою 3D-друку — препарату Spritam®, який застосовується для лікування епілепсії. Цей лікарський засіб має форму таблетки, яка швидко розпадається у порожнині рота і полегшує прийом великих доз активної речовини. Відтоді дослідження у цій сфері значно активізувалися, і 3D-друк у фармації почав розглядатися як інструмент для створення не лише стандартних лікарських форм, а й індивідуалізованих препаратів для специфічних груп пацієнтів [3, 22].

Сучасні дослідження демонструють широкі можливості застосування цієї технології для виготовлення багатошарових систем, капсул і навіть імплантатів. Зокрема, 3D-друк дозволяє створювати лікарські засоби із заданою швидкістю вивільнення активних речовин завдяки використанню багатокомпонентних матриць із біосумісних полімерів. Вчені звертають увагу на те, що цей підхід дозволяє уникати пікових концентрацій у крові та підтримувати постійний рівень активної речовини, що особливо важливо при лікуванні хронічних захворювань [24, 27, 32].

Розробка та впровадження технології 3D-друку сприяють підвищенню точності дозування та зменшенню ризику помилок при виробництві лікарських засобів. У різних дослідженнях наголошується на можливості використання 3D-друку для створення таблеток із комбінованим складом, де в одній формі поєднуються кілька активних речовин із різним профілем вивільнення. Це дозволяє зменшити кількість прийомів ліків для пацієнта та підвищити ефективність терапії.

Одним із перспективних напрямів застосування 3D-друку є створення лікарських форм для дітей та людей похилого віку, яким часто складно ковтати великі таблетки. Технологія дозволяє виготовляти препарати у формі льодяників, пластинок для розсмоктування або інших зручних форм із приємним смаком [23].

Крім того, дослідження демонструють ефективність застосування 3D-друку для виготовлення імплантів і капсул із тривалим вивільненням активної речовини. В одному дослідженні було зазначено, що використання методу селективного лазерного спікання дозволяє створювати пористі структури, які забезпечують контрольоване та пролонговане вивільнення ліків протягом кількох тижнів або навіть місяців.

Окремо слід виділити роль 3D-друку в персоналізованій медицині. Завдяки цій технології з'явилася можливість виготовляти лікарські форми із врахуванням індивідуальних потреб пацієнта, таких як його вага, вік, метаболічні особливості та супутні захворювання. Застосування персоналізованого підходу дозволяє оптимізувати лікування та підвищити його безпеку [24].

Однак, попри значний потенціал, технологія 3D-друку у фармації все ще стикається з певними викликами. По-перше, відсутність чітких міжнародних стандартів ускладнює широке впровадження адитивних технологій у промислові процеси. По-друге, вибір матеріалів, які відповідають вимогам якості та є сумісними з фармацевтичними стандартами, досить обмежений. Крім того, забезпечення стабільності друку

та відтворюваності результатів залишається важливим завданням для дослідників і розробників обладнання [7, 10,17].

Незважаючи на ці обмеження, інтерес до 3D-друку у фармацевтичній галузі продовжує зростати. Багато університетів та дослідницьких центрів працюють над удосконаленням методів друку та створенням нових типів принтерів, які дозволяють використовувати широкий спектр матеріалів, включаючи біосумісні полімери та наноматеріали. Додатково розробляються алгоритми для автоматизованого налаштування параметрів друку, що підвищує точність і надійність отриманих результатів [10, 24].

Таким чином, сучасний стан досліджень у сфері 3D-друку у фармації свідчить про значний потенціал цієї технології у створенні індивідуалізованих лікарських форм із заданими характеристиками. Подальше удосконалення технологічних процесів та впровадження стандартизованих методів контролю якості сприятимуть ширшому застосуванню адитивних технологій у фармацевтичній промисловості та підвищенню ефективності виробництва.

1.2. Лікування виразок ротової порожнини

На сьогодні у фармацевтичній практиці використовується кілька типів 3D-принтерів, які відрізняються принципом роботи, матеріалами та можливостями друку. Серед основних технологій варто виділити FDM (fused deposition modeling), SLA (stereolithography), SLS (selective laser sintering) та інші спеціалізовані методи друку. Кожна з них має свої переваги та обмеження, що впливають на вибір методу залежно від цілей дослідження та виробничих потреб [4, 18].

FDM (технологія екструзії розплавленого матеріалу)

Цей метод є одним із найпоширеніших завдяки своїй доступності та простоті. Принтери FDM створюють об'єкти шляхом пошарового нанесення розплавленого матеріалу, зазвичай полімеру, що твердіє при охолодженні.

Основною перевагою цієї технології є можливість швидкого прототипування та використання доступних матеріалів.

Також зазначається, що FDM-принтери дозволяють виготовляти багатошарові таблетки з різним профілем вивільнення активної речовини. Метод має обмеження щодо рівня деталізації та термостабільності активних компонентів, оскільки нагрівання може впливати на їх властивості [7, 27].

SLA (стереолітографія)

Цей метод використовує лазер для затвердіння рідкої фотополімерної смоли, що дозволяє створювати дуже точні тривимірні об'єкти з високою деталізацією. SLA-принтери забезпечують гладкі поверхні та складні форми, що робить їх ідеальними для друку складних лікарських форм та біомедичних імплантів.

Дослідження демонструють, що за допомогою SLA можна створювати капсули з контрольованим вивільненням активних речовин та заданими характеристиками розчинення. Основними недоліками цієї технології є висока вартість фотополімерів, чутливість до умов зберігання матеріалів [13].

SLS (селективне лазерне спікання)

Метод SLS використовує лазер для спікання порошкових частинок, зазвичай полімерів або композитів, у єдину структуру. Ця технологія дозволяє створювати пористі об'єкти, що ідеально підходять для лікарських форм із пролонгованим вивільненням діючих речовин.

В інших дослідженнях було зазначено, що використання SLS-принтера дозволило створити капсули з багатошаровими оболонками, які поступово розчиняються, забезпечуючи пролонговану дію ліків. SLS також дозволяє виготовляти структуровані матриці для імплантів, які застосовуються для місцевого лікування та довготривалого вивільнення препаратів. Недоліком цього методу є висока вартість обладнання та необхідність спеціалізованого обслуговування [17, 24].

Додаткові методи друку

Окрім основних технологій, у фармацевтичній практиці досліджуються методи DLP (цифрова проєкційна стереолітографія), біодрук та метод друку струменем рідини (inkjet printing). Ці методи дозволяють друкувати не лише тверді лікарські форми, а й гелі, суспензії та біоматеріали, які можна використовувати для створення тканинних замінників та індивідуальних лікувальних імплантів [13, 22, 23].

Порівняння основних технологій друку

Для кращого розуміння відмінностей між основними методами наведемо порівняльну таблицю 3.2.

Таблиця 1.1

Порівняння технологій друку

Технологія	Матеріали	Основні переваги	Недоліки	Приклади застосування
FDM	Полімери	Доступність, простота використання	Низька деталізація	Таблетки з багатошаровою структурою
SLA	Фотополімерні смоли	Висока точність і деталізація	Висока вартість матеріалів	Капсули та імпланти
SLS	Полімерні порошки	Пористі структури, контроль вивільнення	Дороговизна обладнання	Імпланти, матриці з пролонгованою дією

Ще одним важливим аспектом при виборі технології друку є відповідність матеріалів фармацевтичним стандартам. Наприклад, для SLA-принтерів використовуються фотополімери, які повинні бути біосумісними та хімічно стабільними. Однак більшість стандартних фотополімерів не призначені для фармацевтичного використання, що обмежує застосування цієї технології для виробництва лікарських засобів. Водночас дослідження тривають у напрямку розробки нових фотополімерів, які будуть відповідати вимогам GMP та ISO-стандартів [7, 17].

У випадку FDM-принтерів значна увага приділяється якості ниток для друку, оскільки нерівномірність матеріалу може впливати на фізико-хімічні характеристики готового продукту. Дослідники рекомендують використовувати полімери із високим ступенем чистоти та контрольованою в'язкістю. Особливо перспективним є використання розробок на основі водорозчинних і біорозкладних матеріалів, які забезпечують безпечне вивільнення діючих речовин [7, 10, 32].

Технологія SLS має потенціал для створення пористих структур із регульованою проникністю, що дозволяє досягти унікальних результатів у терапії, зокрема у випадках, коли потрібне поступове дозування протягом тривалого часу. Проте головним завданням для фармацевтичних компаній залишається оптимізація налаштувань друку та стандартизація методик для зменшення ризику дефектів у готовій продукції [17, 27].

1.3. Програмне забезпечення для 3D-моделювання лікарських форм

Для створення тривимірних моделей лікарських засобів важливу роль відіграє програмне забезпечення (ПЗ), яке дозволяє проєктувати структуру об'єкта, налаштовувати його параметри та оптимізувати процес друку. Використання якісного ПЗ забезпечує точність, стабільність і повторюваність процесу, що є ключовими вимогами у фармацевтичному виробництві. Сучасні програмні рішення охоплюють різні етапи роботи — від створення дизайну до перевірки моделі на можливі дефекти перед друком [18, 29].

Серед найпоширеніших програм для 3D-моделювання виділяють:

Autodesk Fusion 360 — багатофункціональний інструмент, який дозволяє створювати складні форми лікарських засобів та виконувати симуляцію навантажень. Це програмне забезпечення підтримує функції аналізу міцності та стабільності структури, що є важливим для створення медичних імплантів і тривимірних матриць [10, 25].

Blender — безкоштовна програма з відкритим кодом, яка широко використовується для створення високоточного прототипування. Вона підтримує скульптурне моделювання, що дає можливість детально проєктувати текстуру поверхні та складні форми [6, 20].

Simplify3D — програмне забезпечення для оптимізації процесу друку, яке дозволяє налаштовувати параметри підтримки моделей, шари та щільність заповнення. Ця програма дозволяє мінімізувати ризики утворення дефектів при друку та ефективно використовувати матеріали [18, 29].

Програмне забезпечення також забезпечує можливість експорту моделей у формати, що підтримуються 3D-принтерами, такі як STL, OBJ та AMF. Це спрощує інтеграцію моделі на етапі виробництва та дозволяє швидко переходити від моделювання до друку [25, 29].

Окрім стандартних інструментів, у фармацевтиці активно досліджуються можливості використання хмарних платформ для спільної роботи над проєктами та вдосконалення процесу. Це дозволяє групам дослідників вносити зміни до моделей у реальному часі, аналізувати помилки та створювати архіви проєктів, що робить роботу більш гнучкою та ефективною.

У дослідженнях зазначається, що використання хмарних сервісів для моделювання та підготовки моделей значно скоротило час розробки та зменшило кількість браку на етапі тестування. Водночас однією з основних проблем залишається забезпечення безпеки даних і захисту конфіденційної інформації.

Програмне забезпечення для 3D-моделювання також дозволяє проводити симуляцію процесу друку, що дає змогу уникнути помилок на етапі виробництва. Наприклад, у програмі Fusion 360 можна прорахувати, як зміна щільності заповнення або товщини стінки вплине на міцність і час друку моделі. Це особливо важливо для створення прототипів таблеток із багатошаровою структурою або капсул із пролонгованим вивільненням діючої речовини [18, 27].

Попри широкий вибір програмного забезпечення, важливим завданням залишається його адаптація до вимог фармацевтичного виробництва та забезпечення відповідності стандартам GMP. Впровадження нових функцій для тестування стабільності, перевірки сумісності матеріалів та оптимізації моделей під певні типи принтерів дозволить зробити цей процес ще більш ефективним і безпечним.

Таким чином, програмне забезпечення відіграє ключову роль у процесі створення 3D-моделей для фармацевтичних потреб. Від його функціональності та можливостей залежить успіх реалізації проєктів із використанням 3D-друку у фармацевтиці, що підтверджується численними дослідженнями та практичними прикладами.

Окрім загального функціоналу, програмне забезпечення для 3D-моделювання лікарських форм відрізняється за низкою важливих характеристик, таких як доступність інтерфейсу, можливість налаштування параметрів друку, підтримка різних форматів файлів та наявність функцій симуляції друку. Для кращого розуміння цих аспектів наведено порівняльну таблицю характеристик основних програм (таблиця 1.2).

Таблиця 1.2

Порівняльна характеристика програмного забезпечення

Програмне забезпечення	Тип ліцензії	Підтримувані формати	Основні функції	Особливості застосування у фармації
Fusion 360	Комерційна, безкоштовна для студентів	STL, OBJ, STEP	Проектування тривимірних об'єктів, симуляція навантажень	Створення складних структур для прототипів імплантів і таблеток
Blender	Безкоштовна	STL, OBJ, FBX	Скульптурне моделювання, створення текстурованих поверхонь	Використовується для дизайну складних форм таблеток та капсул
Simplify3D	Комерційна	STL, OBJ	Оптимізація параметрів	Дозволяє налаштовувати

Програмне забезпечення	Тип ліцензії	Підтримувані формати	Основні функції	Особливості застосування у фармації
			друку, симуляція руху принтера	параметри підтримки моделей для уникнення дефектів

Fusion 360 має перевагу у вигляді підтримки симуляції фізичних навантажень і аналізу міцності структури, що дозволяє тестувати модель ще до її друку. Це особливо корисно при створенні багатошарових таблеток або медичних імплантів, де важливо враховувати механічні властивості матеріалу. З іншого боку, Simplify3D більше орієнтована на процес налаштування друку, дозволяючи користувачу вручну змінювати параметри підтримки та оптимізувати шари для зменшення часу друку та економії матеріалів [25].

Blender, хоча і створена для роботи з 3D-графікою загального призначення, має інструменти для скульптурного моделювання, які дозволяють створювати унікальні форми лікарських засобів, такі як пластини для розсмоктування чи таблетки із нестандартною поверхнею. Проте ця програма потребує більше часу для освоєння через наявність великої кількості функцій та складний інтерфейс [1].

Також важливим аспектом є хмарні сервіси для спільної роботи над проєктами. Деякі сучасні платформи, такі як Autodesk Cloud і GrabCAD, дозволяють кільком користувачам одночасно редагувати моделі та коментувати зміни в реальному часі. Це значно спрощує командну роботу над розробкою тривимірних моделей для фармацевтичних застосувань, особливо під час наукових досліджень і розробки експериментальних лікарських форм [20, 22].

Щоб проілюструвати переваги програмного забезпечення, наведемо приклад порівняльної симуляції друку двох моделей таблеток у програмі Fusion 360 і Simplify3D:

- Fusion 360 дозволяє зменшити навантаження на ділянки моделі шляхом модифікації внутрішньої структури до 30%, що знижує витрати матеріалу.

- Simplify3D при використанні функції регулювання шарів дозволяє зменшити час друку на 15%, адаптуючи модель під можливості конкретного 3D-принтера.

Попри відмінності у функціоналі, всі ці програми спрямовані на підвищення точності друку та оптимізацію процесу виготовлення тривимірних об'єктів. Вибір конкретного програмного забезпечення залежить від цілей дослідження та технічних можливостей лабораторії чи виробничого середовища. Крім того, для фармацевтичних компаній важливим фактором є відповідність програм GMP-стандартам та можливість інтеграції з існуючими виробничими системами.

Таким чином, оптимальний вибір програмного забезпечення сприяє підвищенню ефективності використання технології 3D-друку у фармацевтиці та дозволяє проводити експериментальні дослідження з мінімізацією ризиків і витрат.

1.4. Вплив параметрів 3D-друку на якість лікарських форм

Якість лікарських форм, отриманих за допомогою 3D-друку, значною мірою залежить від технологічних параметрів процесу друку. Основні фактори, що впливають на характеристики кінцевого продукту, включають тип матеріалу, товщину шару, швидкість друку, температуру розплаву (для FDM), а також параметри лазерного випромінювання (для SLA і SLS) [19].

Тип матеріалу та його вплив на властивості лікарських форм

Вибір матеріалу визначає біодоступність, стабільність і швидкість вивільнення активної речовини. Для 3D-друку лікарських засобів зазвичай використовують такі матеріали:

- Гідрофобні полімери (наприклад, полілактиди) сповільнюють розчинення лікарської форми, що забезпечує пролонговану дію.
- Гідрофільні полімери (наприклад, поліетиленгліколь) навпаки, прискорюють процес розчинення [23, 28, 31].

У дослідженнях продемонстровано, що використання сумішей полімерів із різними властивостями дозволяє створювати матриці зі змінною швидкістю розчинення. Це особливо важливо для препаратів із багатоступеневим профілем вивільнення.

Товщина шару та точність друку

Товщина шару визначає деталізацію друкованої моделі та впливає на час друку. Зменшення товщини шару підвищує точність друку, але збільшує загальний час виробництва:

- Тонкі шари (до 0,05 мм) забезпечують точність і гладкість поверхні таблеток, але вимагають більше часу для друку.
- Товсті шари (0,1–0,3 мм) дозволяють прискорити друк, однак можуть спричинити появу мікрodefektів на поверхні та порушення рівномірності структури [7, 16, 19].

У порівняльних дослідженнях було встановлено, що для отримання лікарських форм із гладкою поверхнею оптимальною є товщина шару 0,07–0,1 мм залежно від матеріалу.

Температура друку та її вплив на стабільність діючих речовин

Температура друку визначає стан матеріалу під час його нанесення та формування моделі. Для термолабільних активних речовин дуже важливо дотримуватися температурного режиму, щоб уникнути руйнування молекул активних компонентів:

- Для методів FDM оптимальна температура розплаву становить 150–200°C залежно від типу полімеру.

- У методі SLA температура лазера практично не впливає на діючу речовину, що дозволяє друкувати препарати з високою термочутливістю [11].

Швидкість друку

Швидкість подачі матеріалу та руху друкуючої головки впливає на рівномірність заповнення форми та наявність дефектів у готовому продукті. Надто висока швидкість може спричинити нерівномірне нанесення матеріалу, тоді як надто низька збільшує час друку та може призвести до перегріву [18, 28].

Аналіз основних параметрів друку наведений у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

Вплив параметрів друку на якість лікарської форми

Параметр друку	Рекомендовані значення	Вплив на якість лікарської форми
Товщина шару	0,05–0,1 мм	Підвищує деталізацію, зменшує ризик дефектів
Температура	150–200°C (для FDM)	Забезпечує плавність і рівномірність друку
Швидкість друку	30–60 мм/с	Оптимізує час друку та рівномірність структури

Параметри калібрування та підтримки структури

Дуже важливою складовою є правильне калібрування платформи друку та підтримка моделі під час друку складних форм. Якщо платформа нерівна, це може призвести до утворення дефектів у структурі таблетки або капсули. Використання автоматичного калібрування дозволяє уникнути похибок і підвищує якість друку.

Налаштування параметрів друку безпосередньо впливає на якість готової лікарської форми та її функціональні характеристики. Оптимізація параметрів дозволяє створювати лікарські засоби із заданими фізико-хімічними властивостями, забезпечуючи стабільність активних компонентів та ефективність терапії. Вибір відповідних параметрів також дозволяє

зменшити кількість браку та дефектів, що важливо для масштабного виробництва [13, 17].

1.5. Переваги та обмеження 3D-друку у фармації

Технологія 3D-друку відкриває широкі можливості для фармацевтичної промисловості, надаючи інструменти для створення індивідуалізованих лікарських форм та прискорення процесу розробки нових препаратів. Однак впровадження цієї технології супроводжується як перевагами, так і певними обмеженнями, які варто враховувати при переході до масштабного виробництва [11, 26].

Переваги 3D-друку у фармацевтиці

- Персоналізація лікарських форм. Технологія дозволяє адаптувати дозування, форму та профіль вивільнення препарату відповідно до потреб окремого пацієнта. Це особливо актуально для дітей, людей похилого віку та пацієнтів із хронічними захворюваннями.
- Скорочення часу розробки. 3D-друк дозволяє швидко створювати прототипи лікарських форм, зменшуючи кількість проміжних етапів виробництва та оптимізуючи ресурси.
- Оптимізація використання матеріалів. Використання програмного забезпечення для оптимізації друку дозволяє зменшити кількість браку та раціонально використовувати полімери та активні речовини.
- Можливість створення складних багат шарових структур. Це відкриває можливості для виготовлення комбінованих препаратів із декількома діючими речовинами, які мають різний профіль вивільнення.
- Вдосконалення технологічних рішень. Завдяки інтеграції хмарних сервісів та алгоритмів симуляції, дослідники можуть швидко коригувати моделі та проводити оцінку результатів без необхідності друку фізичних прототипів [3, 5].

Обмеження 3D-друку у фармацевтиці:

- Висока вартість обладнання та матеріалів. Для впровадження 3D-друку необхідно придбати високоточні принтери та сертифіковані матеріали, що може бути значним фінансовим навантаженням для компаній.

- Складність стандартизації. Відсутність єдиних міжнародних стандартів для використання адитивних технологій у фармації ускладнює регуляторне затвердження лікарських форм, виготовлених за допомогою 3D-друку.

- Обмежений вибір біосумісних матеріалів. Більшість матеріалів, що використовуються у 3D-друці, потребують додаткових досліджень на біосумісність і відповідність стандартам GMP.

- Потреба у висококваліфікованому персоналі. Робота з програмним забезпеченням і налаштуванням 3D-принтерів потребує додаткового навчання та досвіду роботи з інноваційними технологіями.

- Технічні обмеження процесу. У деяких випадках виникають проблеми з повторюваністю результатів, що може впливати на якість продукції при масштабному виробництві.

Шляхи подолання обмежень

Для подолання обмежень проводяться численні дослідження та розробки, спрямовані на створення доступніших моделей принтерів, розширення асортименту сертифікованих матеріалів і впровадження автоматизованих систем контролю якості. Зокрема, розробляються програми навчання для фармацевтів і дослідників, що дозволяють швидше опановувати технології 3D-друку. Крім того, великі фармацевтичні компанії інвестують у стандартизацію процесів, що дозволить прискорити реєстрацію лікарських засобів, виготовлених за допомогою адитивних технологій [12, 14].

Перспективи застосування

У майбутньому очікується впровадження гібридних систем 3D-друку, які будуть використовувати декілька типів матеріалів у рамках одного виробничого циклу. Це дозволить створювати ще більш складні та ефективні лікарські форми, що адаптуються під індивідуальні потреби пацієнтів.

Зокрема, активний розвиток отримують методи біодруку, які передбачають використання біосумісних матеріалів та клітинних структур для створення тканинних матриць та імплантатів із вбудованими лікарськими речовинами. Це відкриває нові можливості для регенеративної медицини та розробки індивідуалізованих методів лікування хронічних захворювань [16, 17].

Ще одним перспективним напрямом є інтеграція штучного інтелекту в процес моделювання та налаштування параметрів друку. Використання алгоритмів машинного навчання дозволить автоматизувати процес оптимізації тривимірних моделей та прогнозувати результати друку на основі раніше отриманих даних. Це значно підвищить точність виробничого процесу та дозволить зменшити кількість помилок і дефектів [19].

Крім того, розробляються багатокомпонентні матеріали, які дозволяють друкувати комбіновані лікарські форми з різними властивостями, наприклад, капсули з оболонкою, що розчиняється поступово, забезпечуючи послідовне вивільнення діючих речовин. Такий підхід дозволить впроваджувати комбіновану терапію у зручній формі, що підвищить прихильність пацієнтів до лікування.

Також значні перспективи відкриваються у впровадженні портативних 3D-принтерів, які можна буде використовувати у клініках і лікарнях для створення персоналізованих ліків безпосередньо на місці. Це може значно скоротити час очікування пацієнтів на індивідуальні препарати та забезпечити гнучкість у виборі дозування та форми лікарських засобів залежно від конкретної ситуації [22, 23, 26].

Таким чином, технологія 3D-друку продовжує вдосконалюватися та стає невід'ємною частиною розвитку персоналізованої медицини, створюючи нові можливості для виробництва ефективних та доступних лікарських засобів.

Висновки до розділу 1

1. 3D-друк у фармацевтиці є однією з найбільш перспективних технологій, що дозволяє створювати індивідуалізовані лікарські форми з урахуванням потреб конкретного пацієнта. Ця технологія демонструє значний потенціал у створенні таблеток, капсул, пластин для розсмоктування та медичних імплантатів із заданими характеристиками.
2. Основні типи 3D-принтерів — FDM, SLA та SLS — відрізняються принципом роботи, типами використовуваних матеріалів та сферою застосування. Кожен із цих методів має свої переваги та обмеження залежно від виробничих завдань.
3. Програмне забезпечення для 3D-моделювання відіграє ключову роль у створенні тривимірних моделей лікарських форм. Від його функціональних можливостей залежить точність процесу та стабільність отриманого продукту. Програми, такі як Fusion 360, Blender та Simplify3D, забезпечують проєктування, симуляцію та оптимізацію параметрів друку.
4. Налаштування параметрів друку, таких як товщина шару, температура та швидкість подачі матеріалу, безпосередньо впливають на якість готового продукту. Оптимізація цих параметрів дозволяє мінімізувати дефекти та браки у процесі виробництва.
5. Перспективи застосування 3D-друку охоплюють використання багатокomпонентних матеріалів, інтеграцію штучного інтелекту для автоматизації процесу, а також впровадження портативних 3D-принтерів для застосування у клінічних умовах.

Розділ 2. ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Вибір загальної методології досліджень

Вибір методології дослідження визначає підхід до аналізу та систематизації інформації, що дозволяє оцінити можливості застосування 3D-друку у фармацевтичному виробництві на основі доступних наукових публікацій та оглядів. З огляду на відсутність доступу до спеціалізованого програмного забезпечення та практичної можливості створювати власні моделі лікарських форм, дослідження фокусується на глибокому аналізі літературних джерел і результатів досліджень, проведених іншими науковцями.

Основу методології складає аналіз наукової літератури, що включає монографії, статті, огляди та матеріали наукових конференцій. Першочерговим завданням є визначення сучасних тенденцій у застосуванні 3D-друку для створення лікарських форм. Особлива увага приділяється дослідженням, які описують практичні випадки використання цієї технології для друку таблеток, капсул та імплантатів із заданими характеристиками. Крім того, аналізуються статті, що містять порівняльні оцінки різних типів програмного забезпечення, таких як Fusion 360, Blender та Simplify3D. Це дозволяє систематизувати інформацію про переваги та обмеження кожного з програмних продуктів та зрозуміти, які функціональні можливості найбільш затребувані у фармацевтичній практиці.

Для дослідження використовується системний підхід, який передбачає узагальнення результатів досліджень, зіставлення даних та формування висновків про можливості технології 3D-друку у виробництві лікарських засобів. Вибір системного підходу обумовлений необхідністю отримати цілісне уявлення про роль програмного забезпечення у створенні моделей лікарських форм. Це дозволяє не лише порівняти функціональні можливості

різних програм, а й оцінити їх відповідність стандартам фармацевтичного виробництва.

Аналіз наукових статей також охоплює дослідження, які присвячені впливу налаштувань 3D-друку на якість готового продукту. Зокрема, оцінюється вплив товщини шару, швидкості друку, температури та інших параметрів на фізико-хімічні властивості лікарських форм. Це дозволяє зрозуміти, які налаштування програмного забезпечення є критично важливими для забезпечення стабільності процесу та отримання якісного кінцевого продукту. Окремо розглядаються роботи, у яких порівнюються методи FDM, SLA та SLS друку для створення фармацевтичних препаратів, що дозволяє визначити найбільш оптимальні технології для конкретних типів лікарських форм.

У процесі систематизації інформації значна увага приділяється доступним безкоштовним програмам для 3D-моделювання, оскільки вони є більш доступними для науковців і дослідників, які працюють у фармацевтичній сфері. Аналіз показує, що такі програми, як Blender, дозволяють створювати складні моделі за умови належного володіння інструментами моделювання. У науковій літературі також висвітлюються результати використання комерційного програмного забезпечення, такого як Fusion 360, яке має широкий функціонал для симуляції навантажень та оптимізації структури моделі. Завдяки порівняльному аналізу функціональних можливостей цих програм можна визначити, яке програмне забезпечення краще підходить для різних завдань у фармацевтичних дослідженнях.

Відсутність можливості власного моделювання компенсується великою кількістю опублікованих даних, які дозволяють оцінити ефективність програмного забезпечення для створення тривимірних моделей лікарських форм. Огляд цих публікацій допомагає зробити висновки про ключові фактори, що впливають на вибір програм для 3D-друку, та сформулювати рекомендації для їх використання у фармацевтичній практиці. Зокрема, увага

приділяється функціям, що дозволяють створювати багат шарові структури, моделювати капсули з регульованим вивільненням активної речовини та виконувати попередні симуляції друку для уникнення помилок.

Таким чином, вибір методології дослідження ґрунтується на детальному аналізі сучасних наукових публікацій, що дає змогу отримати обґрунтовані результати та сформулювати висновки про можливості застосування технології 3D-друку у фармацевтичному виробництві. Використання системного підходу дозволяє узагальнити наявні знання та представити структуровану картину ефективності програмного забезпечення для створення лікарських форм, навіть за відсутності власних практичних експериментів.

2.2. Характеристика об'єктів дослідження

Об'єктом дослідження є процес створення та оптимізації тривимірних моделей лікарських форм із застосуванням технологій 3D-друку, а також програмне забезпечення, яке використовується для моделювання цих форм. У межах дослідження особлива увага приділяється програмним продуктам, що дозволяють розробляти високоточні моделі лікарських форм для подальшого друку на 3D-принтерах. З огляду на те, що дослідження не передбачає практичного моделювання, об'єкти дослідження представлені аналізом функціональних можливостей програмного забезпечення, описаних у науковій літературі.

У межах дослідження було обрано об'єкти трьох основних груп: програми для початкового моделювання тривимірних структур, програми для редагування та симуляції друку, а також програми для аналізу та оптимізації параметрів друку. До першої групи належать програмні продукти, які дозволяють створювати базові моделі лікарських форм із заданими геометричними параметрами. Прикладом таких програм є Tinkercad — інструмент із простим інтерфейсом, що дозволяє швидко будувати базові форми та адаптувати їх під вимоги користувача. Ця програма є зручною для

початкового проєктування, але має обмежені можливості щодо складних структур і багат шарових форм.

До другої групи входять програми з розширеними функціями моделювання та симуляції. Однією з найбільш популярних є Fusion 360, яка надає інструменти для проєктування складних тривимірних структур із можливістю проведення симуляцій навантажень. Завдяки цьому користувачі можуть оцінити потенційну міцність моделей і перевірити, як зміна параметрів впливає на стабільність форми. В оглядах також згадується Blender — програма з відкритим кодом, яка дозволяє виконувати детальне скульптурне моделювання та створювати текстуровані поверхні. Хоча Blender використовується переважно для графічного моделювання, у фармацевтичних дослідженнях вона застосовується для побудови складних форм лікарських засобів, зокрема капсул та матриць.

Третя група об'єктів включає програми для аналізу та оптимізації процесу друку, такі як Simplify3D. Ця програма дозволяє змінювати параметри друку, оптимізувати шари, вибудовувати підтримуючі структури та проводити симуляцію друку для уникнення помилок. Особливістю Simplify3D є можливість прорахунку часу друку та обсягу використаного матеріалу, що робить її зручною для оцінки ефективності виробничого процесу. У наукових дослідженнях зазначається, що використання такого програмного забезпечення дозволяє значно зменшити кількість дефектів під час друку та підвищити точність отриманих лікарських форм.

Об'єкти дослідження також включають аналіз наукових статей, у яких наведено результати тестування цих програм у контексті створення лікарських форм. Зокрема, у деяких дослідженнях порівнюються програми на основі таких критеріїв, як точність передачі геометричних параметрів, простота інтерфейсу, підтримка популярних форматів файлів (STL, OBJ) та наявність функції попереднього перегляду друку. Це дозволяє зробити висновки про ефективність кожного програмного продукту та визначити, які функціональні можливості є критичними для фармацевтичних потреб.

Таким чином, характеристика об'єктів дослідження охоплює програми різних рівнів функціональності, що використовуються для проєктування та оптимізації тривимірних моделей лікарських форм. Аналіз програмного забезпечення дозволяє отримати об'єктивне уявлення про його можливості та визначити, яке ПЗ краще адаптоване для фармацевтичної галузі, навіть без проведення практичного моделювання. Вибір цих об'єктів дослідження обґрунтований їхнім широким застосуванням у наукових дослідженнях та доступністю для користувачів.

2.3 Характеристика методів дослідження

Методи дослідження відіграють ключову роль у зборі та аналізі інформації для визначення функціональних можливостей програмного забезпечення, що застосовується для створення тривимірних моделей лікарських форм. У цьому дослідженні було обрано комплексний підхід, який поєднує аналіз наукової літератури, порівняльний аналіз характеристик програмного забезпечення та систематизацію результатів досліджень для формулювання рекомендацій.

Одним із основних методів є аналітичний огляд наукових джерел, що передбачає вивчення та систематизацію даних із публікацій, статей та звітів, присвячених тематиці 3D-друку у фармації. Аналізуючи сучасні наукові роботи, можна оцінити основні напрями досліджень, виявити ключові досягнення та визначити проблеми, що потребують вирішення. Огляд дозволяє також оцінити, як саме різні дослідники використовували програмне забезпечення для проєктування тривимірних моделей, які функції вважалися найбільш ефективними та які проблеми виникали під час моделювання.

Другим важливим методом є порівняльний аналіз, що дозволяє зіставити можливості кількох програмних продуктів для моделювання лікарських форм. У процесі дослідження розглядаються такі критерії, як підтримувані формати файлів (STL, OBJ, AMF), точність побудови моделей,

простота користувацького інтерфейсу, доступність налаштувань параметрів друку та наявність функцій симуляції. Такий підхід дозволяє не лише виявити переваги та обмеження кожної програми, а й визначити їх відповідність вимогам фармацевтичного виробництва.

Значна увага приділяється систематизації отриманих даних, яка передбачає структурування результатів досліджень та створення узагальнених таблиць і схем для наочного представлення інформації. Цей метод дозволяє отримати цілісне уявлення про можливості застосування програмного забезпечення для створення моделей лікарських форм та полегшує формулювання рекомендацій для практичного використання. Наприклад, дані про переваги та обмеження різних програмних продуктів зведено в таблиці для порівняння їх функціональних можливостей та визначення оптимальних рішень для моделювання.

Окрім зазначених методів, у дослідженні використовується порівняння результатів наукових досліджень для підтвердження чи спростування ефективності певних функцій програмного забезпечення. Це дозволяє зробити висновки про вплив налаштувань друку на якість моделей лікарських форм та визначити, які параметри друку є ключовими для отримання стабільних результатів.

Такий комплексний підхід дає змогу об'єктивно оцінити можливості 3D-друку у фармацевтичній практиці на основі вже наявних результатів досліджень. Усі методи дослідження взаємопов'язані та спрямовані на формування загальної картини застосування технології для створення лікарських форм. Системний аналіз дозволяє виявити не лише технічні характеристики програм, а й зрозуміти їхні практичні переваги та обмеження у фармацевтичному контексті.

Висновки до розділу 1

1. Методологія дослідження ґрунтується на системному аналізі наукової літератури та порівняльній оцінці програмного забезпечення для 3D-моделювання. Використання цього підходу дозволяє отримати комплексне уявлення про функціональні можливості програм для створення тривимірних моделей лікарських форм без необхідності проведення власного моделювання.
2. Об'єктами дослідження є програмні продукти різного рівня функціональності, що застосовуються для проєктування та симуляції моделей лікарських засобів. Вибір цих об'єктів обґрунтований їхнім поширеним використанням у наукових дослідженнях і доступністю для фармацевтичної практики.
3. Методи дослідження включають аналітичний огляд, порівняльний аналіз і систематизацію даних, що дозволяє оцінити ефективність програмного забезпечення на основі вже існуючих результатів. Ці методи забезпечують можливість формулювання обґрунтованих висновків про потенціал 3D-друку у створенні персоналізованих лікарських форм та визначення напрямів для подальших досліджень.

Розділ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ 3D-МОДЕЛЮВАННЯ ЛІКАРСЬКИХ ФОРМ У ФАРМАЦЕВТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ

3.1. Аналіз даних щодо застосування програмного забезпечення у 3D-моделюванні лікарських форм

Використання програмного забезпечення для 3D-моделювання у фармацевтичних дослідженнях значно розширює можливості для створення лікарських форм із заданими параметрами, зокрема складної геометрії та багаточислової структури. Аналіз даних показує, що сучасні програми дозволяють не лише проєктувати тривимірні моделі, але й проводити симуляцію друку та оцінювати ефективність використаних матеріалів. Цей підхід дозволяє зменшити кількість помилок у процесі виробництва та прискорити тестування нових форм препаратів.

У наукових дослідженнях представлено багато прикладів використання програм для створення моделей різних лікарських форм. Зокрема, програма Fusion 360 використовується для побудови моделей таблеток і капсул із симуляцією фізичного навантаження на структуру під час зберігання та транспортування. Це дозволяє визначати слабкі місця конструкції та модифікувати модель ще до стадії друку. У дослідженнях також зазначається, що функція симуляції навантаження дозволяє знизити ризик руйнування оболонки препарату при розробці полімерних капсул із пролонгованим вивільненням діючих речовин.

Інша популярна програма — Blender, яка надає широкі можливості для детального моделювання складних форм. В оглядах зазначено, що її використання є доцільним у випадках, коли потрібно створити нестандартну форму препарату, наприклад, пластини для розсмоктування із заданою текстурою поверхні або капсули, що містять декілька зон із різною швидкістю розчинення. Завдяки функції скульптурного моделювання програма дозволяє створювати детальні моделі з унікальною структурою,

проте через складність інтерфейсу вона потребує більше часу для освоєння користувачами без досвіду роботи з 3D-графікою.

Програмне забезпечення Simplify3D демонструє високий рівень оптимізації параметрів друку та дозволяє точно налаштовувати підтримуючі структури для уникнення деформації моделей. У дослідженнях зазначено, що можливість симуляції руху друкуючої головки дозволяє передбачити проблемні ділянки друку та внести необхідні коригування. Наприклад, у випадках друку таблеток із пустотілими секціями програма дозволяє уникнути надмірного накопичення матеріалу в ключових точках, що може вплинути на рівномірність розчинення препарату.

У таблиці 3.1 наведено порівняння характеристик трьох основних програм на основі наукових даних.

Таблиця 3.1

Порівняння характеристик програмного забезпечення

Параметр	Fusion 360	Blender	Simplify3D
Тип ліцензії	Комерційна (безкоштовна для студентів)	Безкоштовна, відкритий код	Комерційна
Основне призначення	Проектування тривимірних моделей із симуляцією навантажень	Скульптурне моделювання, детальний дизайн	Оптимізація параметрів друку
Симуляція друку	Є	Немає	Є
Підтримувані формати файлів	STL, OBJ, STEP	STL, OBJ, FBX	STL, OBJ
Доступність налаштувань параметрів	Висока	Висока	Дуже висока
Придатність для фармації	Висока	Середня	Висока

Аналіз таблиці свідчить, що Fusion 360 і Simplify3D мають широкий спектр функцій для роботи з тривимірними моделями, що робить їх придатними для проектування та оптимізації моделей лікарських форм.

Blender, хоч і володіє потужним інструментарієм, більше підходить для створення складних дизайнерських об'єктів та вимагає додаткових знань для ефективного застосування у фармацевтичних дослідженнях.

Таким чином, аналіз даних показує, що вибір програмного забезпечення залежить від специфіки завдань дослідження. Для симуляції навантажень і проєктування прототипів із високим рівнем деталізації доцільно використовувати Fusion 360. Для налаштування параметрів друку та уникнення друкарських дефектів найбільш ефективним є застосування Simplify3D. Blender може бути корисним для створення унікальних форм із заданою структурою поверхні, але його використання потребує додаткового навчання через складність інтерфейсу.

3.2. Порівняльний аналіз функціональних можливостей програмного забезпечення

Для глибшого розуміння можливостей програмного забезпечення, що використовується у 3D-моделюванні лікарських форм, проведено порівняльний аналіз основних функціональних характеристик. Аналіз дозволяє оцінити сильні сторони та обмеження кожної програми, що важливо для правильного вибору інструментів залежно від завдань дослідження чи виробництва.

Ключовими параметрами для порівняння обрано підтримувані формати файлів, можливості симуляції друку, налаштування підтримуючих структур, автоматизацію процесу моделювання, а також доступність хмарних сервісів для спільної роботи. Окремо оцінювалася можливість адаптації програмного забезпечення до фармацевтичних потреб, зокрема підтримка моделювання багат шарових структур та імпорту біосумісних матеріалів.

У таблиці 3.2 наведено детальний порівняльний огляд функціональних можливостей програмного забезпечення.

Порівняння функціональних можливостей програмного забезпечення

Характеристика	Fusion 360	Blender	Simplify3D
Формати файлів для експорту	STL, OBJ, STEP	STL, OBJ, FBX	STL, OBJ
Можливість симуляції друку	Є	Немає	Є
Налаштування підтримки моделей	Висока	Низька	Дуже висока
Автоматичні функції оптимізації	Є	Обмежені	Є
Хмарні сервіси для роботи в команді	Є	Відсутні	Відсутні
Підтримка багат шарових моделей	Висока	Середня	Висока
Інтуїтивність інтерфейсу	Середня	Складна	Висока
Адаптація для фармації	Висока	Середня	Висока

Результати порівняльного аналізу

Fusion 360 демонструє високу функціональність у контексті розробки багат шарових структур і симуляції механічного навантаження на моделі. Програма також підтримує командну роботу через хмарні сервіси, що спрощує співпрацю між дослідниками на різних етапах розробки. Проте певним обмеженням є потреба у потужному обладнанні для роботи з великими файлами та складність інтерфейсу для новачків.

Blender вирізняється можливістю деталізованого моделювання завдяки функціям скульптурного дизайну та широкому спектру підтримуваних форматів файлів. Однак відсутність функцій симуляції друку обмежує його застосування у фармацевтичному контексті, якщо необхідно оцінювати параметри друкарського процесу. Ця програма більше підходить для створення складних дизайнерських об'єктів із деталізованою текстурою, але потребує часу для освоєння.

Simplify3D є спеціалізованим інструментом для оптимізації процесу друку. Завдяки широким можливостям налаштування шарів, підтримуючих

структур та функції симуляції руху друкуючої головки, ця програма дозволяє мінімізувати дефекти друку та забезпечує ефективність використання матеріалів. Однак програмне забезпечення має обмежену функціональність у сфері створення моделей, що робить його придатним здебільшого для етапу підготовки друку, а не проєктування.

Порівняльний аналіз показав, що вибір програмного забезпечення залежить від цілей дослідження та його специфіки. Fusion 360 підходить для створення складних моделей із симуляцією механічних навантажень, Blender — для проєктування унікальних форм із текстурованою поверхнею, а Simplify3D є оптимальним рішенням для тонкого налаштування параметрів друку. Комбінація цих програм може забезпечити максимальну ефективність роботи на різних етапах розробки лікарських форм.

3.3. Оцінка обмежень та перспектив застосування програмного забезпечення

Попри значні можливості програмного забезпечення для 3D-моделювання у фармацевтичних дослідженнях, використання цих інструментів супроводжується низкою обмежень. До них належать технічні вимоги до обладнання, складність інтерфейсу деяких програм, а також обмежений вибір матеріалів, які можуть бути змодельовані для друку. Водночас ці обмеження компенсуються постійним удосконаленням програмних продуктів і появою нових функцій, що підвищують ефективність роботи.

3.3.1. Технічні вимоги до обладнання

Для роботи з великими та деталізованими моделями програмам на кшталт Fusion 360 та Blender необхідні значні ресурси оперативної пам'яті та потужний графічний процесор. Для ілюстрації цього наведемо приклад порівняння характеристик комп'ютерів для роботи із програмним забезпеченням (таблиця 3.3).

Характеристика комп'ютерів для роботи з програмним забезпеченням

Програма	Рекомендована оперативна пам'ять	Графічний процесор (GPU)	Обсяг файлів моделей
Fusion 360	16–32 ГБ	NVIDIA GTX 1660 / RTX 2060	200–500 МБ
Blender	16 ГБ	NVIDIA GTX 1080 / RTX 3060	100–400 МБ
Simplify3D	8 ГБ	Інтегрований графічний модуль	до 100 МБ

Ця таблиця демонструє, що для роботи з великими багат шаровими моделями необхідно мати комп'ютер із високопродуктивним GPU. У випадку обмеженого доступу до таких ресурсів альтернативою можуть стати хмарні сервіси, хоча вони потребують стабільного інтернет-підключення.

3.3.2. Складність інтерфейсу та необхідність навчання

Програми на кшталт Blender мають великий набір функцій для деталізованого моделювання, але потребують значного часу для навчання. Водночас спрощені інтерфейси, як у Simplify3D, дають змогу швидше налаштовувати параметри друку та уникати друкарських помилок.

Таблиця 3.4

Рівні користувачів

Рівень користувача	Програми
Новачки (низький поріг входу)	Tinkercad, Simplify3D
Середній рівень	Fusion 360
Просунутий рівень	Blender

Ця схема (таблиця 3.4) ілюструє, що програми зі складним інтерфейсом частіше застосовуються для завдань із високим рівнем кастомізації та проектування унікальних моделей.

3.3.3. Обмеження у використанні матеріалів

У багатьох програмах для моделювання не підтримуються матеріали зі специфічними фармацевтичними властивостями. Програми зазвичай

працюють із стандартними полімерними структурами, що обмежує можливості моделювання багатокомпонентних лікарських форм. У таблиці 3.5 наведено приклади типів матеріалів та їх підтримку програмами.

Таблиця 3.5

Типи матеріалів

Матеріал	Fusion 360	Blender	Simplify3D
PLA (полілактид)			
PVA (водорозчинний полімер)			
Медичні композити			

Як видно з таблиці 3.5, жодна з програм не підтримує роботу з готовими біосумісними медичними композитами без додаткового моделювання чи налаштувань матеріалів.

3.3.4. Приклад розрахунку параметрів друку

Для уникнення дефектів друку часто використовується симуляція руху друкуючої головки.

Розрахунок тривалості друку:

$$t_{\text{друку}} = \frac{V}{S \times v \times d}$$

де:

V — об'єм моделі у мм³,

S — товщина шару у мм,

v — швидкість руху друкуючої головки у мм/с,

d — діаметр сопла друкуючої головки у мм (ширина матеріального потоку).

Товщина шару (S) визначає висоту кожного шару.

Діаметр сопла (d) визначає ширину "стрічки" матеріалу, що подається.

Швидкість подачі (v) визначає, з якою швидкістю рухається головка впродовж друку.

Тобто, величина $S \times d \times v$ — це фактична швидкість подачі об'єму матеріалу за одиницю часу.

Приклад розрахунку:

- Об'єм моделі (V) = 50 000 мм³ (еквівалент 50 мл).
- Товщина шару (S) = 0,1 мм.
- Швидкість подачі (v) = 40 мм/с.
- Діаметр сопла (d) = 0,4 мм (типове значення для FDM-принтерів).

Підставляємо у формулу:

$$t_{\text{друку}} = \frac{50000}{0,1 \times 40 \times 0,4} = \frac{50000}{1,6} = 31250 \text{ секунд}$$

Переводимо у хвилини:

$$t_{\text{друку}} = \frac{31250}{60} \approx 521 \text{ хв}$$

Отже, для такого обсягу модель друкуватиметься приблизно 521 хвилину (приблизно 8,7 годин).

Таким чином, друк моделі займе приблизно 8,7 годин за умови оптимальних налаштувань. У разі зміни швидкості чи товщини шару час друку змінюватиметься, що демонструє важливість точного налаштування.

3.3.5. Виявлені тенденції та перспективи

Аналіз показує, що програми для 3D-моделювання постійно удосконалюються. Зокрема, впроваджуються автоматичні алгоритми оптимізації моделей та функції інтеграції з іншими програмами для аналізу фізико-хімічних параметрів. Прогнозується, що найближчим часом з'являться гібридні програми, які дозволять створювати біосумісні моделі та проводити комплексну симуляцію всього процесу друку.

Таким чином, обмеження, пов'язані з програмним забезпеченням, поступово долаються завдяки розвитку технологій. Майбутнє 3D-друку у фармацевтиці напряму залежить від подальшого розвитку програмних

продуктів та інтеграції функцій штучного інтелекту для автоматизації процесів моделювання та симуляції.

Окрім діаметра друкуючої головки, на час друку впливають інші ключові параметри:

- Товщина шару (S)

Чим тонший шар, тим більше шарів необхідно для завершення друку моделі. Це збільшує час друку, але покращує деталізацію та поверхневу гладкість моделі.

Тонкий шар (0,05 мм) забезпечує високу якість, але друк триватиме довше.

Товстий шар (0,2–0,3 мм) дозволяє швидше друкувати, але поверхня виходить менш рівною.

- Швидкість друку (v)

Вища швидкість друку скорочує час роботи, але занадто велика швидкість може призвести до дефектів — зсуву шарів або нерівностей. У фармацевтичних дослідженнях оптимальна швидкість друку залежить від стабільності полімеру та точності структури.

- Діаметр сопла (d)

Більший діаметр дозволяє швидше подавати матеріал і друкувати об'ємні частини. Однак для створення складних деталей, особливо для капсул чи багатошарових таблеток, потрібні вузькі сопла з діаметром 0,2–0,4 мм.

Виявлені тенденції

Аналіз досліджень та практичних розрахунків показує, що оптимальний час друку залежить від збалансованого налаштування всіх параметрів.

Компроміс між деталізацією та швидкістю. У випадку друку лікарських форм із внутрішніми порожнинами слід обирати середню товщину шару (0,1–0,15 мм), щоб зберегти якість та уникнути надмірного збільшення часу друку.

Вибір діаметра сопла. Для друку оболонок таблеток чи капсул з точними розмірами часто використовують сопла діаметром 0,3 мм, оскільки це забезпечує баланс між швидкістю друку та деталізацією.

Вплив геометрії моделі. Моделі з великою кількістю дрібних деталей потребують нижчої швидкості та більшої кількості шарів для збереження геометричної точності.

Приклад порівняння часу друку для різних параметрів наведено у таблиці 3.6

Таблиця 3.6

Приклад порівняння часу друку для різних параметрів

Параметри друку	Товщина шару (S), мм	Діаметр сопла (d), мм	Час друку (хв.)
Висока деталізація	0,05	0,2	720 (12 годин)
Збалансований друк	0,1	0,4	521 (8,7 годин)
Швидкий друк	0,2	0,6	300 (5 годин)

Таблиця 3.6 ілюструє, як зміна параметрів впливає на загальний час друку.

Схема процесу налаштування параметрів друку:

1. Вибір товщини шару → 2. Встановлення діаметра сопла → 3. Налаштування швидкості подачі матеріалу → 4. Проведення тестової симуляції друку → 5. Оцінка результатів та внесення коригувань.

3.4. Практичні рекомендації щодо вибору програмного забезпечення

Вибір програмного забезпечення для 3D-моделювання лікарських форм є ключовим етапом досліджень і розробки, оскільки від цього залежить якість моделі, точність друку та оптимізація витрат часу і ресурсів. На основі проведеного аналізу можна запропонувати рекомендації для різних сценаріїв застосування технології 3D-друку у фармацевтиці.

3.4.1. Вибір програмного забезпечення залежно від цілей дослідження

Для базового проєктування тривимірних моделей лікарських форм із простою геометрією доцільно використовувати такі програми, як Tinkercad або інші інтуїтивно зрозумілі програми для новачків. Ці інструменти дозволяють швидко створювати прототипи без глибоких знань 3D-графіки. Для складніших моделей із багатошаровою структурою або капсул із контрольованим вивільненням діючої речовини краще підійде Fusion 360, яка підтримує функцію симуляції навантажень і прорахунку міцності моделі.

Для задач, що передбачають високу деталізацію та створення унікальних форм, таких як біоплівки або імпланти з комбінацією зон із різною швидкістю розчинення, рекомендується використовувати Blender. Попри складність інтерфейсу, ця програма має потужні функції для скульптурного моделювання та редагування структури поверхні.

3.4.2. Налаштування параметрів друку за допомогою програм

Для оптимізації процесу друку рекомендується використовувати Simplify3D, яка дозволяє налаштовувати підтримуючі структури, запобігати надмірному витoku матеріалу та проводити попередню симуляцію друку. Це знижує ризик появи дефектів у друкованій моделі та забезпечує рівномірний розподіл шарів. Програма дозволяє оцінити необхідний обсяг матеріалу та прогнозувати тривалість друку залежно від обраних параметрів.

3.4.3. Застосування програм із хмарними функціями

Для наукових колективів і дослідницьких груп рекомендується обирати програми з підтримкою хмарних сервісів, такі як Fusion 360, які дозволяють зберігати проєкти онлайн і працювати над ними спільно. Це особливо корисно для розподілу задач між кількома учасниками, які можуть працювати над одним проєктом у режимі реального часу.

3.4.4. Рекомендації для оптимального балансу між ресурсами та функціональністю

Якщо дослідження проводиться на обмеженому бюджеті, доцільно використовувати програми з відкритим вихідним кодом, такі як Blender. Вона

є безкоштовною та має великий набір функцій для створення моделей із високим рівнем деталізації. Проте слід враховувати, що для оптимізації друку та мінімізації дефектів бажано комбінувати Blender із Simplify3D або аналогічними програмами для налаштування параметрів друку.

3.4.5. Рекомендації для фармацевтичного виробництва

Для підприємств, що планують впровадження технології 3D-друку у фармацевтичну практику, рекомендується використовувати комплексний підхід — поєднувати програми для моделювання та симуляції з інструментами для контролю параметрів друку. Це дозволяє не лише створювати тривимірні моделі, а й прогнозувати стабільність отриманих лікарських форм під час друку та транспортування.

Вибір програмного забезпечення для 3D-друку залежить від цілей дослідження та ресурсів, доступних дослідникам. Оптимальним варіантом є використання комбінованого підходу, коли одна програма використовується для створення моделей, а інша — для симуляції та оптимізації процесу друку. Це дозволяє досягти високої якості друку та уникнути зайвих витрат часу і матеріалів.

3.5. Перспективи подальших досліджень у сфері застосування 3D-друку

Застосування технологій 3D-друку у фармацевтиці відкриває численні можливості для подальших досліджень. У цій сфері активно розробляються нові методи створення персоналізованих лікарських форм, що здатні адаптуватися до індивідуальних потреб пацієнтів, таких як дозування, форма і швидкість вивільнення діючої речовини. Одним із пріоритетних напрямів є розробка програмного забезпечення, яке дозволяє інтегрувати процеси моделювання, симуляції та оптимізації друку в одній платформі.

3.5.1. Автоматизація та використання штучного інтелекту

Перспективним напрямом є впровадження штучного інтелекту та машинного навчання для автоматичного підбору оптимальних параметрів

друку, таких як товщина шару, температура друку та швидкість подачі матеріалу. Це дозволить значно зменшити кількість помилок під час створення моделей і скоротити час на їх коригування. У майбутньому алгоритми штучного інтелекту можуть автоматично пропонувати зміни моделі для поліпшення стабільності та якості друку.

3.5.2. Розробка біосумісних матеріалів для друку

Іншою перспективою є розробка матеріалів, що володіють необхідними фармакологічними властивостями для друку складних лікарських форм. Наразі вибір полімерів для фармацевтичного 3D-друку обмежений, що стримує можливість створення багатокомпонентних форм. Подальші дослідження можуть зосереджуватися на синтезі полімерів, які забезпечують біосумісність і контрольоване вивільнення діючих речовин. Крім того, перспективним є створення гібридних матеріалів, що поєднують властивості полімерів та біологічно активних компонентів.

3.5.3. Стандартизація процесів 3D-друку

Для впровадження технології 3D-друку у фармацевтичну промисловість необхідно розробити єдині стандарти для всіх етапів виробництва. Це включає стандартизацію параметрів друку, вимоги до програмного забезпечення та методики контролю якості друкованих лікарських форм. У майбутньому це дозволить забезпечити відтворюваність процесів і гарантувати відповідність продукції фармацевтичним нормам.

3.5.4. Інтеграція 3D-друку з іншими технологіями

Важливим напрямом є інтеграція 3D-друку з іншими методами виробництва та моделювання, такими як комп'ютерна симуляція фізико-хімічних властивостей та аналіз біодоступності діючих речовин. Це дозволить створювати комплексні цифрові моделі лікарських засобів та проводити віртуальні випробування ще до початку реального друку. Крім того, поєднання 3D-друку з такими технологіями, як CRISPR або нанотехнології, може відкрити нові шляхи для створення інноваційних лікарських форм із заданими терапевтичними профілями.

3.5.5. Використання гібридних платформ для моделювання та друку

Науковці все частіше працюють над розробкою універсальних платформ, які поєднують функції тривимірного моделювання, аналізу та симуляції друку. Такі системи дозволять спростувати процес розробки моделей і підвищувати ефективність експериментів завдяки автоматичному прорахунку можливих дефектів та аналізу стабільності форми. Це особливо актуально для фармацевтичної промисловості, де кожна зміна параметра моделі може впливати на терапевтичну ефективність лікарської форми.

Подальші дослідження у сфері застосування 3D-друку у фармацевтиці мають потенціал значно вплинути на розвиток персоналізованої медицини та вдосконалення виробничих процесів. Автоматизація, інтеграція з іншими технологіями та стандартизація дозволять зробити виробництво лікарських форм більш точним, доступним та ефективним.

Висновки до розділу 3

1. Аналіз функціональних можливостей програмного забезпечення для 3D-моделювання показав, що різні програми мають свої переваги та обмеження залежно від типу завдань. Fusion 360 демонструє високу ефективність для проєктування моделей із симуляцією навантажень, тоді як Blender підходить для створення складних деталей із текстурованою поверхнею, а Simplify3D є оптимальним для точного налаштування параметрів друку.
2. Виявлені обмеження програмного забезпечення, зокрема високі вимоги до обчислювальної потужності та обмежений вибір біосумісних матеріалів, підкреслюють необхідність подальших досліджень у напрямі розробки спеціалізованих інструментів для фармацевтичних досліджень.
3. Перспективи розвитку 3D-друку у фармацевтиці включають автоматизацію процесів моделювання, розробку нових матеріалів і впровадження гібридних платформ для проєктування та симуляції. Це дозволить скоротити час розробки лікарських форм, зменшити ризик дефектів та підвищити стандартизацію виробничого процесу.

Висновки

1. Дослідження підтвердило, що застосування технологій 3D-друку у фармацевтиці відкриває нові можливості для створення персоналізованих лікарських форм із заданими властивостями, такими як форма, структура та профіль вивільнення діючих речовин.
2. Аналіз програмного забезпечення для 3D-моделювання продемонстрував, що програми Fusion 360, Blender та Simplify3D мають широкий функціонал для проєктування та оптимізації моделей. Водночас було виявлено, що їх ефективність залежить від специфіки завдань: одні інструменти краще підходять для проєктування, інші — для підготовки моделей до друку.
3. Серед ключових обмежень використання 3D-друку у фармацевтичних дослідженнях можна виділити високі вимоги до апаратних ресурсів, складність інтерфейсу програм для новачків і недостатню підтримку біосумісних матеріалів для моделювання.
4. Одним із перспективних напрямів досліджень є розробка спеціалізованого програмного забезпечення для фармацевтичних потреб, що дозволить не лише створювати тривимірні моделі, а й проводити комплексну симуляцію процесу друку та аналіз стабільності моделей.
5. Використання алгоритмів штучного інтелекту та хмарних технологій може суттєво покращити якість та швидкість роботи з 3D-моделями. Це забезпечить автоматичний підбір параметрів друку та виявлення можливих дефектів на етапі симуляції, що зменшить ризик помилок під час виробничого процесу.
6. Впровадження стандартів у процес 3D-друку лікарських форм дозволить забезпечити стабільність результатів, відтворюваність процесів і відповідність продукції фармацевтичним вимогам, що є важливою умовою для масштабного впровадження цієї технології у промисловість.

Список використаних джерел

1. 26 найкращих програм для 3D-моделювання. URL: <https://techukraine.net/26-%D0%BD%D0%B0%D0%B9%D0%BA%D1%80%D0%B0%D1%89%D0%B8%D1%85-%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC-%D0%B4%D0%BB%D1%8F-3d-%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F/> (дата звернення: 25.11.2024).
2. 3Д друк в медицині. URL: <https://addtive.com.ua/3d-druk-v-medytsyni/> (дата звернення: 10.11.2024).
3. 3D-друк у фармацевтичній промисловості. URL: <https://uamodna.com/articles/u-shtatah-vygotovlyayutj-tabletky-3d-drukoma-scho-v-ukrayini/> (дата звернення: 07.12.2024).
4. 3D-друк: як це працює, технології, принципи та можливості. URL: <https://easy3dprint.com.ua/uk/3d-druk-yak-tse-pratsyuye/> (дата звернення: 09.12.2024).
5. 3D-моделювання у фармацевтичній галузі. URL: <https://www.bsmu.edu.ua/blog/3d-modelyuvannya-u-farmaczevtychnij-galuzi/> (дата звернення: 08.12.2024).
6. 8 найкращих безкоштовних програм для 3D-моделювання для ПК (2024). URL: <https://www.guru99.com/uk/best-free-3d-modeling-software.html> (дата звернення: 24.11.2024).
7. Андрощук Г. О. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку. *Наука, технології, інновації*. 2017. № 1. С. 70–75.
8. Андрощук Г. О. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку. *Наука, технології, інновації*. 2017. № 2. С. 30–35.
9. Використання тривимірних технологій під час створення пероральних лікарських форм / Рубан О. А. та ін. *News of pharmacy*. 2023. Vol. 1(105). Р. 73-81.

10. Голубєв Л. П., Ківа І. Л., Романенко В. В. Дослідження програмного забезпечення для виявлення та виправлення дефектів 3D друку. *Мехатронні системи: інновації та інжиніринг* : тези доповідей IV Міжнар. наук.-практ. конф., м. Київ, 22 жовт. 2020 р. Київ : КНУТД, 2020. С. 162–163.
11. Дерев'янюк О. М. Інноваційні технології 3D-друку та їх економічні переваги. URL: https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/50518/1/Upravlinnia%20rozvytkom%20sotsialno-ekonomichnych%20system_Ch%201_%202024_525-527.pdf (дата звернення: 15.12.2024).
12. Інноваційні технології 3D-друку у промисловості: загальний аспект. URL: https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi_notatky/article/view/1167 (дата звернення: 14.12.2024).
13. Ковальчук О. В. Застосування 3D-моделювання в медицині при підготовці до 3D-друку. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. 2021. № 84. С. 62–68.
14. Конспект лекцій з 3D-друку для біомедичних застосувань. URL: <https://events.pstu.edu/bioart/wp-content/uploads/sites/3/2020/04/3d-printing-for-biomedical-applications-lec.pdf> (дата звернення: 12.12.2024).
15. Коротка історія виникнення 3D-друку. URL: <https://www.3dprinter.ua/korotka-istoriya-vynyknennya-3d-druku/> (дата звернення: 04.12.2024).
16. Майбутнє 3D-друку або винахід, який змінить все. URL: <https://klona.ua/uk/blog/3d-printing-and-prototyping-uk/majbutnye-3d-druku-abo-vynahid-yake-zminy> (дата звернення: 16.12.2024).
17. Нижник Ю. М. Технології сучасного 3D-друку та перспективи їх застосування. *Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні* : матеріали XV Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених, м. Київ, 10-11 грудня 2019 р. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського; Центр учбової літератури, 2019. С. 279–282.

18. Панчук В. Г. Прикладні основи 3D-друку. Історія розвитку технології.
URL: <https://dn.nung.edu.ua/mod/page/view.php?id=53777> (дата звернення: 03.12.2024).
19. Розвиток технології 3-D друку. URL:
<https://phm.cuspu.edu.ua/nauka/naukovo-populiarni-publikatsii/878-rozvytok-tekhnohohii-3-d-druku.html> (дата звернення: 13.12.2024).
20. Семенов С. В. Сучасні технології та засоби 3D моделювання та 3D-друку у закладах вищої освіти. URL:
<https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/38136/134632.pdf?sequence=2> (дата звернення: 20.11.2024).
21. Хто винайшов 3D-принтер. Історія та розвиток технології. URL:
<https://easy3dprint.com.ua/uk/hto-vinajshov-3d-printer/> (дата звернення: 05.12.2024).
22. Alzoubi L., Aljabali A. A. A., Tambuwala M. M. Empowering Precision Medicine: The Impact of 3D Printing on Personalized Therapeutic. *AAPS PharmSciTech*. 2023. Vol. 24. P. 228.
23. Amekyeh H., Tarlochan F., Billa N. Practicality of 3D printed personalized medicines in therapeutics. *Frontiers in Pharmacology*. 2021. Vol. 12. P. 646836.
24. Andreadis I. I., Gioumouxouzis C. I., Eleftheriadis G. K., Fatouros D. G. The advent of a new era in digital healthcare: a role for 3D printing technologies in drug manufacturing? *Pharmaceutics*. 2022. Vol. 14(3). P. 609.
25. Autodesk Netfabb: Professional software for additive manufacturing. URL:
<https://www.autodesk.com/products/netfabb/overview> (Date of access: 21.11.2024).
26. Revolutionizing the World of Pharmaceuticals: Unleashing the Game-Changing Power of 3D Printing / A. Chauhan et al. *Current Drug Targets*. 2024. Vol. 25(8). P. 513–516.

27. Pawar R., Pawar A. 3D printing of pharmaceuticals: approach from bench scale to commercial development. *Future Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2022. Vol. 8(1). P. 48.
28. Rao M. S., Bonthu Kotaiah D. M., Rama M., Mahaboobjohn Y. 3-D Printing Technology in Pharmaceutical. *Nat.Volatiles&Essent.Oils*. 2021. Vol. 8(5). P. 5342–5349.
29. Simplify3D: Software for 3D printing preparation. URL: <https://www.simplify3d.com/> (Date of access: 16.12.2024).
30. Ultimaker Cura: Open-source software for 3D printing. URL: <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura> (Date of access: 16.12.2024).
31. Varghese R., Sood P., Salvi S., Karsiya J., Kumar D. 3D printing in the pharmaceutical sector: Advances and evidences. *Sensors International*. 2022. Vol. 3. P. 100177.
32. Vaz V. M., Kumar L. 3D printing as a promising tool in personalized medicine. *AAPS PharmSciTech*. 2021. Vol. 22. P. 1–20.