

УДК 339.1:004.8:661

<https://doi.org/10.37827/ntsh.chem.2025.78.007>

Віктор МАЛИШЕВ¹, Юрій ЛІПСЬКИЙ², Ангеліна ГАБ¹, Дмитро ШАХНІН¹

СВІТОВИЙ РИНОК ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ХІМІЧНІЙ ПРОМИСЛОВOSTІ

¹ПЗВО «Міжнародний Європейський Університет»
просп. Акад. Глушкова, буд. 42Б, 03187 Київ, Україна
email: viktor.malyshev.igic@gmail.com

²Національна академія статистики, обліку та аудиту
вул. Підгірна, 1, 04107 Київ, Україна
email: lipskyu@mineralis.com.ua

Об'єктом дослідження є загальна характеристика світового ринку штучного інтелекту в хімічній промисловості.

Підтверджено, що підприємства та установи хімічної промисловості все більше використовують штучний інтелект для бізнесу і наукових пошуків. Штучний інтелект ширше застосовують у хімічній промисловості завдяки використанню прогнозової аналітики для передбачення можливих небезпек і проактивного їх зменшення, а також створенню реалістичного досвіду віртуальної реальності, що імітує небезпечні ситуації. Впровадженням штучного інтелекту в цій сфері є дослідження та розвиток, виробництво, прогнозування та планування, управління ризиками. Аналіз наукових публікацій щодо ринку штучного інтелекту в хімічній промисловості свідчить про значну його інтеграцію в процеси хімічного виробництва. Прогнозується, що ринок буде зростати з середньорічним сукупним темпом зростання 32 % у період з 2025 до 2034 року.

Для проведення маркетингового аналізу застосовано метод пошуку літературних даних і метод аналізу. Аналіз ринку штучного інтелекту в хімічній промисловості проведено за такими сегментами: географічні регіони, тип розгортання, призначення витрат, застосування, призначення, кінцеве використання, перспективні технології. Визначено чинники зростання ринку, тенденції та можливості ринку, потенційний попит і обсяг ринків різних країн світу, динаміку та конкуренцію на світовому ринку.

Оцінено обсяги та динаміку світових ринків хімічної продукції (агрохімікатів, хімічної продукції, каталізаторів, спецхімікатів), обладнання (сенсорів, приладобудування), інтернету речей.

Ключові слова: штучний інтелект, хімічна промисловість, світовий ринок, сегментний аналіз, тенденції.

Вступ

Застосування штучного інтелекту (ШІ) – процес активного використання найсучасніших наукових досягнень у сфері інформатики в різних галузях життє-

діяльності суспільства. Стрімкий розвиток технологій неможливо уявити без інновацій ІІІ у різних галузях [1, 2]. Серед 20 топ-застосувань ІІІ помічено все більше його інтегрування в освіту [3], медицину [4], різні галузі промисловості, зокрема в хімічну. В майбутньому ІІІ, безсумнівно, відіграє ще значнішу роль у формуванні багатьох секторів.

Хімія є фундаментальною наукою, яка стимулює технологічні інновації, розкриваючи таємниці матерії та даючи змогу створювати новаторські матеріали. Традиційні хімічні дослідження часто стикаються зі значними проблемами, такими як трудомісткі процеси проб і помилок, складність моделювання молекулярних взаємодій і величезна кількість можливих комбінацій реакцій. Для прискорення хімічних досліджень зростає значення розгляду потенційних застосувань штучного інтелекту в хімії [5]. У огляді [6] досліджено зростання та поширення публікацій з хімії, пов'язаних із ІІІ, за останні два десятиліття. Обсяг публікацій і в журналах, і патентів різко збільшився, особливо з 2015 року.

В [7] зазначено, що понад 80 % керівників підприємств та установ хімічної промисловості, опитаних IBM, визнають, що ІІІ останнім часом має величезний вплив на їхній бізнес і наукові пошуки. Сфери, в які ІІІ найчастіше впроваджують у цьому секторі, є дослідження та розвиток (74 %), виробництво (61 %), прогнозування та планування (47 %), управління ризиками (58 %). Згідно з опитуванням, проведеним Accenture Accenture [8], 94 % керівного персоналу хімічної промисловості та індустрії сучасних матеріалів очікують оцифрування усієї галузі за допомогою ІІІ.

Аналіз наукових публікацій щодо ринку ІІІ в хімічній промисловості [5–10] свідчить про значну інтеграцію технологій ІІІ у процеси хімічного виробництва. Відомі «гравці» ринку, такі як IBM, NVIDIA та BASF, використовують ІІІ для поліпшення розробки продуктів та оптимізації процесів, тим самим підвищуючи операційну ефективність та інновації. Стосовно злиттів і поглинань, то у серпні 2023 року Microsoft придбала компанію з аналізу даних, що спеціалізується на рішеннях ІІІ для хімічної промисловості, прагнучи посилити свої можливості в галузі ІІІ в цьому секторі. Крім того, Accenture розширює свій портфель, співпрацюючи з Cargill, щоб використовувати ІІІ у виробництві харчових продуктів та управлінні ланцюгами поставок.

Обсяги ринку зростають завдяки розвитку технологій ІІІ, які оптимізують виробничі процеси та поліпшують прогнозне обслуговування, що зрештою позитивно вплине на прибутковість. Протягом останніх кількох років, з 2021 до 2023 року, такі компанії, як Honeywell та Siemens, досягли успіхів, інвестуючи значні кошти в ініціативи з досліджень та розробок у сфері ІІІ, зосереджені на сталому розвитку хімічної промисловості. Ця тенденція відображає прагнення світової спільноти впроваджувати технологічні інновації в хімічну промисловість для досягнення екологічного спрямованішого та ефективнішого хімічного виробництва.

У дослідженні [11] зазначається, що поточні хімічні процеси є сприятливою технологією для автоматизованого синтезу й ІІІ є потужним інструментом у різних сферах цього напрямку, враховуючи технологію аналізу процесу й оптимізацію реакції синтезу. Поєднання хімії безперервного потоку та ІІІ стимулює розвиток хімічного виробництва. В дослідженні [12] повідомляється, що розроблена за допомогою ІІІ система в змозі визначити кожну можливу реакцію із заданим набором матеріалів. На ІІІ не впливає обмеження традиційної вченої освіти в галузі хімії та

наукової інтуїції. Також робот-хімік може спокійно працювати зі сполуками, які небезпечні для людини, та передбачати неперевірені реакції з точністю більше 80 %.

Штучний інтелект знаходить все більше способів застосування у хімічній промисловості завдяки:

- використанню прогнозової аналітики для передбачення можливих небезпек та проактивного їх зменшення – ШІ пропонує революційні рішення з вирішенням проблеми методами машинного навчання, особливо за допомогою моделей навчання з учителем; для передбачення збоїв у майбутньому ШІ у хімічному секторі може бути навчений з використанням життєво важливих даних виробничих потужностей щодо можливого виникнення аварій;
- створенню реалістичного досвіду віртуальної реальності, що імітує небезпечні ситуації – ШІ має потенціал повністю трансформувати навчання з безпеки; доповнена реальність використовується для навчання робочої сили та зменшення ймовірності катастроф, а симуляції на основі ШІ можуть забезпечити віртуальне тестування процедур безпеки та планів реагування на надзвичайні ситуації.

Мета статті – виконати загальну характеристику світового ринку штучного інтелекту в хімічній промисловості, дослідити чинники впливу, тенденції та можливості ринку, оцінити ринки хімічних речовин та обладнання.

Результати та обговорення

Загальна характеристика світового ринку ШІ в хімічній промисловості

Світовий ринок ШІ в хімічній промисловості у 2024 році становив 1,78 млрд дол. США і оцінюється у 2,29 млрд дол. у 2025 році. Прогнозується, що він досягне приблизно 28 млрд дол. до 2034 року, зростаючи з середньорічним сукупним темпом зростання (ССТЗ) 32,05 % у період з 2025 до 2034 року. Обсяг ринку ШІ в хімічній промисловості Північної Америки у 2024 році становив 701,9 млрд дол. та буде зростати з ССТЗ 31,01 % протягом прогнозованого періоду (рис. 1) [13]. Інтеграція ШІ в галузі, які працюють з хімічними речовинами, є вирішальним кроком в оптимізації різних процесів, що зумовлює зростання ринку.

Обсяг ринку ШІ в хімічній промисловості за даними інформаційного звіту [14] оцінювався в 3,06 млрд дол. США у 2023 році та в 3,49 млрд дол. у 2024 році. Очікується його зростання до 15 млрд дол. до 2035 року з ССТЗ 14,17 % протягом прогнозованого періоду (2025–2035).

В інформаційному звіті [15] обсяг ринку ШІ в хімічній промисловості оцінювався в 1,84 млрд дол. у 2024 р. і, за прогнозами, він зростатиме до 2,42 млрд дол. у 2025 році та до 21,81 млрд дол. до 2033 року із ССТЗ 31,6 % за період 2025–2033 років. Обсяг ринку ШІ в хімічній промисловості за даними інформаційного звіту [16] становив 1,89 млрд дол. у 2024 році і, за очікуваннями, буде зростати до 24,74 млрд дол. у 2034 році із ССТЗ 29,33 % за період 2025–2033 років. Обсяги ринку ШІ в хімічній промисловості та прогнозовані значення ССТЗ збігаються в дослідженнях [13, 15, 16]. Розбіжність із даними дослідження [14] зумовлена різною кількістю та найменуванням сегментів, а також кількістю підсегментів у конкретному сегменті.

Головні висновки щодо використання ШІ на ринку хімічних речовин у 2024 році:

- Північна Америка домінувала на ринку з часткою доходу 39,4 %;
- за кінцевим використанням сегмент послуг мав найбільшу частку ринку 40,22 %;
- за застосуванням сегмент базових хімікатів і нафтохімікатів мав найбільшу частку ринку 57,5 %;
- за застосуванням сегмент інше мав найбільшу частку ринку 30,20 %.

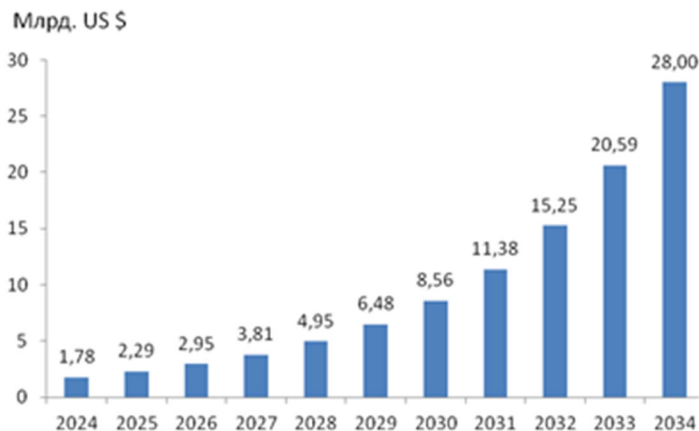


Рис. 1. Обсяг світового ринку ШІ в хімічній промисловості, млрд. дол. США (побудовано на підставі даних [13]).

Fig. 1. Global AI market size in the chemical industry, billion USD (built on the basis of data [13]).

Узагальнення результатів досліджень [5–8, 13] дає змогу виокремити чинники зростання ШІ на світовому ринку хімічної продукції:

- визначальна роль «зеленої хімії» для розвитку галузі хімічної промисловості – у сфері зеленої хімії, де основна увага приділяється створенню технологій і продуктів, що зменшують або повністю виключають використання та виробництво небезпечних матеріалів, ШІ стимулює відповідні інновації; дослідники можуть визначати умови проведення реакцій і процесів розчинення, які оптимізують вихід кінцевого продукту, одночасно зменшуючи відходи та споживання енергії, використовуючи прогнозне моделювання на основі ШІ;
- автоматизація хіміко-технологічних процесів – ШІ допомагає створювати платформи для автономного хімічного синтезу, в яких роботизовані системи можуть виконувати складні операції синтезу з мінімальною участю з боку людини; ці платформи використовують алгоритми ШІ для моніторингу процесу реагування в режимі реального часу та планування й виконання «маршруту» синтезу;
- ефективне управління ланцюгом поставок – хімічна промисловість значною мірою залежить від ефективного управління ланцюгом поставок для

зменшення втрат ресурсів; прогнозування попиту, транспортна логістика та управління запасами поліпшуються завдяки аналітиці на основі ШІ.

Сегментація світового ринку ШІ в хімічній промисловості

Сегментація світового ринку ШІ в хімічній промисловості за географічними регіонами. У 2024 році Північна Америка займала найбільшу частку світового ринку (39,4 %). Решті географічних регіонів відповідали такі частки ринку: Європа – 26,6 %, Азійсько-Тихоокеанський регіон – 24,8 %, Близький Схід та Африка – 5,1 %, Латинська Америка – 4,0 % (рис. 2) [13].

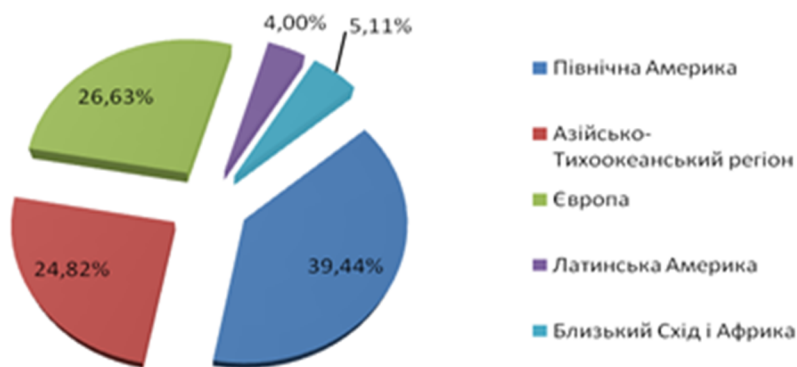


Рис. 2. Сегментація світового ринку ШІ в хімічній промисловості за географічними регіонами (2024 рік), % (побудовано на підставі даних [13]).

Fig. 2. Segmentation of the global AI market in the chemical industry by geographical regions (2024), % (built on the basis of data [13]).

З рис. 2 і 3 видно, що сегментація за іншою кількістю сегментів практично не вплинула на розташування географічних регіонів за часткою доходу ринку.

Домінування Північної Америки зумовлено такими важливими чинниками:

- досягнення у технологіях ШІ, таких як машинне навчання та прогнозна аналітика – призводять до заохочення інновацій і підвищення ефективності хімічної промисловості;
- потреба у зниженні витрат та підвищенні ефективності хімічної галузі – застосування рішень на основі ШІ в хімічному виробничому секторі сприяють вирішенню цієї проблеми;
- зросла увага до екологічних норм та сталого розвитку – призводить до заохочення використання методів на базі ШІ для зменшення відходів і максимізації енергоефективності;
- збільшений попит на персоналізовані товари та послуги – хімічні компанії спонукані впроваджувати ШІ для рішень, орієнтованих на клієнта, та індивідуальних методів виробництва через збільшений попит на персоналізовані товари та послуги.

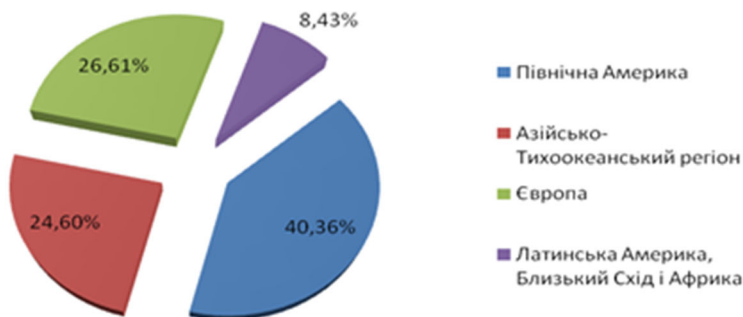


Рис. 3. Сегментація світового ринку ІІІ в хімічній промисловості за географічними регіонами (2024 рік), % (побудовано на підставі даних [16]).

Fig. 3. Segmentation of the global AI market in the chemical industry by geographical regions (2024), % (built on the basis of data [16]).

Обсяг ринку ІІІ в хімічній галузі США оцінюється в 804,12 млн дол. у 2025 році та, за прогнозами, перевищить 9050,04 млн дол. до 2034 року, зростаючи з вражаючим ССТЗ 30 % протягом прогнозованого періоду з 2025 до 2034 року (рис. 4) [13].

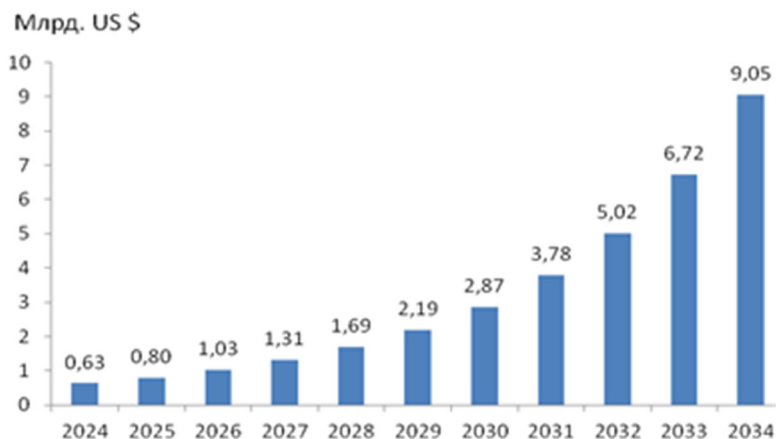


Рис. 4. Обсяг ринку ІІІ в хімічній промисловості США, млрд. дол. США (побудовано на підставі даних [13]).

Fig. 4. AI market size in the US chemical industry, billions of US dollars (built on the basis of data [13]).

Хімічна промисловість США залежить від торговельної діяльності галузі. Протягом багатьох років хімічний сектор підтримував профіцит торговельного балансу як другий за величиною експортер промислових товарів. Експорт хімікатів та інших промислових товарів зі Сполучених Штатів забезпечує близько 200000 працівників хімічного сектору. Після скорочення у 2023 році експорт хімічної продукції США зріс на 2,1 % у 2024 році. Крім того, імпорт хімічної продукції до США збільшився на 1,2 % у 2024 році. Протягом прогнозного періоду експорт хімічної продукції, за прогнозами, зростатиме в середньому на 4—5 % на рік, тоді як імпорт збільшуватиметься в середньому на 7 % на рік, за умови будь-яких змін у торговельній політиці [13]. Протягом прогнозного періоду Сполучені Штати Америки підтримуватимуть профіцит у торгівлі хімічною продукцією.

Оскільки економічно ефективна сировина та зниження валютного курсу забезпечують експортний поштовх, то очікується, що у 2025 році сектор промислової хімії Канади збільшить обсяги поставок на 1—4 % завдяки стабільним операційним показникам. Поставки промислової хімії зросли на 1,5 % у 2024 році порівняно з рівнем 2023 року, закінчивши рік на рівні 27,8 млрд дол. США за загальними щомісячними показниками або очікуваними 32,4 млрд дол. за остаточними показниками 2024 року. Через зростання обсягів і цін експорт зріс на 4 % у 2024 році, досягнувши рекордних 25,5 млрд дол. до кінця року [13]. Нижчі ціни на сировину, низький обмінний курс канадського долара до долара США та інтеграція у стабільну економіку США сприяють розвитку канадської промислової хімії.

Очікується, що протягом прогнозованого періоду ринок ШІ в хімічній галузі в Європі розвиватиметься найшвидшими темпами серед усіх географічних регіонів. Розширення європейського ринку зумовлено низкою динамічних причин:

- зросла потреба в ефективності та оптимізації процесів – точніше управління виробничими процесами стало можливим завдяки здатності технологій ШІ оцінювати дані та відстежувати діяльність у режимі реального часу;
- впровадження рішень на основі ШІ через нормативні вимоги та проблеми сталого розвитку – зменшення витрат та підвищення ефективності – для збільшення споживання ресурсів, зменшення кількості відходів і наслідків для навколишнього середовища хімічні компанії змушені впроваджувати рішення на основі ШІ; алгоритми, що використовує ШІ, можуть допомогти розробляти стійкі продукти та екологічно чистіші процеси;
- впровадження технологій ШІ стимулюється зрослим акцентом європейської хімічної промисловості на інноваціях та конкуренції – для отримання конкурентної переваги на світовому ринку підприємства використовують ШІ для поліпшення розробки продукції, гарантування контролю якості та збору ринкової інформації.

З посиленням тенденції до конкурентної моделі циркулярної економіки потужна хімічна промисловість Німеччини впроваджує кілька інноваційних технологій у таких різноманітних галузях, як переробка акумуляторів та хімічне відновлення текстилю.

Зауважимо, що широке впровадження ШІ в Північній Америці та Європі значною мірою зумовлене науковими дослідженнями в галузі інформатики у цих регіонах. Відповідно до аналітичного звіту [17] обсяг світового ринку ШІ у 2024 році становив 638,23 млрд дол. США, у 2025 році – 757,58 млрд дол., а до

2034 року очікується, що він досягне приблизно 3680,47 млрд дол., зростаючи зі ССТЗ 19,20 % з 2025 до 2034 року. Частки доходу ринку географічних регіонів у 2024 році становили: Північна Америка – 36,92 %, Європа – 25,97 %, Азійсько-Тихоокеанський регіон – 25,50 %, Латинська Америка і Близький Схід та Африка – 11,61 %.

В аналітичному звіті [18] зазначено, що Північна Америка має найбільший регіональний ринок програмного забезпечення на базі ШІ, головною метою якого є передові новатори у сфері ШІ, що базуються у Сполучених Штатах. У 2025 році 54 % загальних інвестицій у програмне забезпечення для ШІ надходитимуть від північноамериканських компаній. Загальний обсяг інвестицій в апаратне та програмне забезпечення ШІ у 2023 році становив 82,43 млрд дол. Частки обсягу інвестицій за окремими країнами та регіонами становили: США – 61,4 %, Китай – 13,6 %, ЄС – 7,4 %, Індія – 3,4 %, Велика Британія – 3,2 %, Ізраїль – 1,9 %, інші – 9,1 %.

В аналітичному звіті [19] відмічено, що Північна Америка домінувала на світовому ринку управління даними з ШІ з часткою доходу понад 32,0 % у 2023 році. Північноамериканські компанії постійно шукають способи оптимізації процесів та автоматизації завдань. Інструменти управління даними на основі ШІ можуть автоматизувати збір, організацію та аналіз даних, звільняючи людські ресурси для зосередження на стратегічніших завданнях. Європейський ринок управління даними на основі ШІ займав частку 13 % у світовому регіоні.

Обсяг світового ринку платформ для обробки даних оцінювали в 150,73 млрд дол. США у 2024 році та, як очікується, досягне приблизно 676,51 млрд дол. до 2034 року, зростаючи зі ССТЗ 16,20 % з 2024 до 2034 року [20]. Частки доходу ринку географічних регіонів у 2023 році становили: Північна Америка – 36 %, Європа – 29 %, Азійсько-Тихоокеанський регіон – 25 %, Латинська Америка – 6 %, Близький Схід та Африка – 4 %.

Обсяг світового ринку лабораторної інформатики у 2024 році оцінювався в 3,83 млрд. дол. США, а до 2034 року прогнозується, що він досягне приблизно 5,22 млрд дол., зростаючи зі ССТЗ 3,14 % з 2025 до 2034 року [21]. Зростання впровадження передових технологій у лабораторіях та підвищена увага до автоматизації лабораторій стимулюють зростання ринку. Частки доходу ринку географічних регіонів у 2023 році становили: Північна Америка – 43,00 %, Європа – 25,45 %, Азійсько-Тихоокеанський регіон – 23,99 %, Латинська Америка – 4,52 %, Близький Схід та Африка – 3,03 %.

Дані аналітичних звітів [19-21] підтверджують провідні позиції Північної Америки та Європи в галузі наукових інформаційних досліджень, що сприяє зростанню ринку ШІ в хімічній промисловості.

Сегментація світового ринку ШІ в хімічній промисловості за типом розгортання. Ринок ШІ в хімічній промисловості продемонстрував значне зростання, особливо в сегменті типів розгортання, який відіграє важливу роль у формуванні динаміки галузі. Типи розгортання зазвичай поділяються на три ключові напрями [5, 6, 9, 13, 14]:

- ✓ локальні рішення – локальні системи, яким часто надають перевагу через посилений контроль над даними та безпеку, обслуговують організації, які надають пріоритет суворому дотриманню нормативних вимог;

- ✓ хмарні рішення – навпаки, набирають популярності завдяки своїй масштабованості та гнучкості, що дає змогу компаніям швидко адаптуватися до змін ринку без значних інвестицій в IT-інфраструктуру;
- ✓ гібридні моделі – поєднують локальні та хмарні функції, стають дедалі популярнішими, оскільки дають змогу організаціям адаптувати своє розгортання відповідно до конкретних операційних вимог.

Всі ці варіанти розгортання разом підвищують ефективність, стимулюють інновації та розширюють можливості, відображаючи різні потреби організацій на світовому ринку ШІ в хімічній продукції. Зі зростанням попиту розуміння цих сегментів стає вирішальним для зацікавлених сторін, які прагнуть ефективно застосовувати технології ШІ в хімічній промисловості.

Сегментація світового ринку ШІ в хімічній промисловості за призначенням витрат. У 2024 році сегмент послуг лідував на ринку з часткою доходу 40,3 %. Сегменти програмного забезпечення та обладнання мали частки 37,1 % та 22,6 %, відповідно (рис. 5) [13].

Значна частка сегменту програмного забезпечення зумовлена пришвидшенням процесу проектування хімічних речовин і виробництв завдяки використанню ШІ, машинного навчання та комп'ютерних обчислень у інструментах проектування. Автоматизація проектування та підвищення ефективності хімічного синтезу – дві переваги цієї технології. Носимі пристрої з використанням програмного забезпечення для машинного навчання можуть відстежувати концентрацію та втому оператора, а обладнання – появу корозії й інших проблем безпеки та пропонувати необхідні ремонтні заходи.

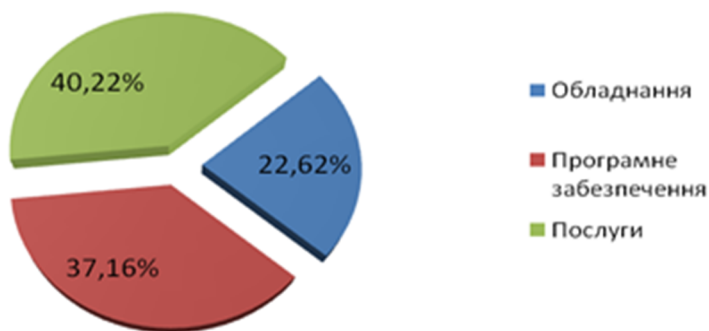


Рис. 5. Сегментація світового ринку ШІ в хімічній промисловості за призначенням витрат (побудовано на підставі даних [13]).

Fig. 5. Segmentation of the global AI market in the chemical industry by purpose of expenditure (built on the basis of data [13]).

Очікується, що сегмент апаратного забезпечення зростатиме з найвищим ССТЗ протягом прогнозованого періоду через зрослу потребу в спеціалізованих апаратних компонентах, таких як пам'ять і процесори ШІ, використанні алгоритмів ШІ для складних процедур. Для вирішення автономних когнітивних цифрових

конфліктів, розвитку сектора апаратного забезпечення ШІ та машинне навчання створюють й аналізують дедалі більшу кількість записів у режимі реального часу.

Сегментація світового ринку ШІ в хімічній промисловості за застосуванням. Відповідно до сегментації, у 2024 році усі використані сім сегментів мали частки доходу ринку в межах 9,1–10,6 % (рис. 6) [13].

Домінування сегмента винайдення нових матеріалів стало можливим завдяки спроможності технологій ШІ забезпечувати зниження витрат, пошук кращих хімічних характеристик, прискорення виходу продуктів і технологій на ринок, відповідність продукту вимогам ринку з самого початку процесу його створення.

У сфері дослідження матеріалів автоматизовані, паралельні та ітеративні процедури, що функціонують на базі ШІ, моделювання та експериментальної автоматизації, доповнюють традиційну ручну та серійну працю, яка потребує від людини значних витрат часу. Очікується, що сегмент оптимізації продукції буде зростати з найвищим ССТЗ протягом прогнозованого періоду. Машинне навчання створює керовані даними моделі для хімічного виробництва, які визначають тенденції, передбачають результати та оптимізують процедури.

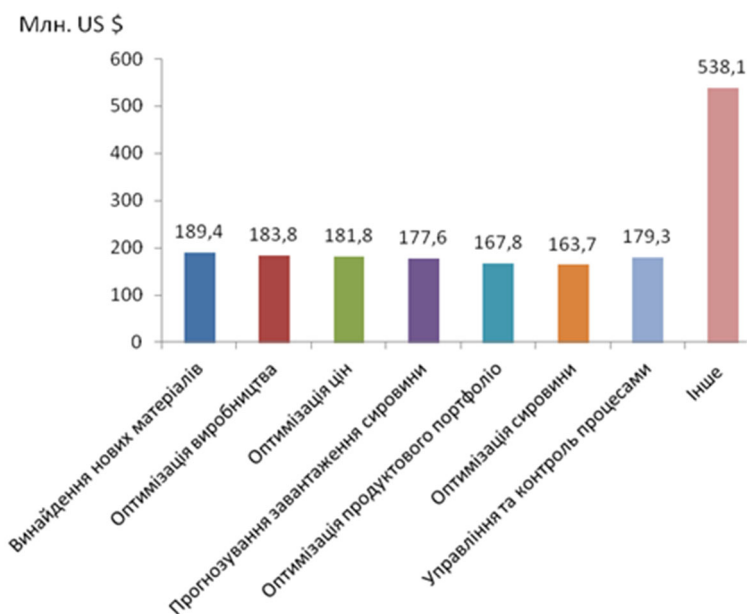


Рис. 6. Обсяги окремих сегментів світового ринку ШІ в хімічній промисловості за застосуванням, 2024 р., млн. дол. США (побудовано на підставі даних [13]).

Fig. 6. Volumes of individual segments of the global AI market in the chemical industry by application, 2024, million USD (built on the basis of data [13]).

Сегментація світового ринку ШІ в хімічній промисловості за призначенням. Відповідно сегментації ринку за призначенням (оптимізація процесів, прогнозне обслуговування, контроль якості, управління ланцюгом поставок), сегмент

оптимізації процесів домінував на ринку та оцінювався в 1,05 млрд дол. США у 2024 році (частка доходу ринку – 30,1 %) з прогнозованим зростанням до 5,0 млрд дол. у 2035 році (рис. 7) [14]. Оптимізація процесів забезпечує аналіз даних у режимі реального часу для вдосконалення хімічних процесів та зменшення відходів.

Прогнозоване технічне обслуговування оцінювалось в 0,9 млрд дол. у 2024 році (частка сегмента – 25,8 %) та, за прогнозами, досягне 4,2 млрд дол. у 2035 році. Сегмент використовує ШІ для прогнозування збоїв обладнання до їх виникнення, уникаючи дорогих простойв і збільшуючи термін служби обладнання.



Рис. 7. Сегментація світового ринку ШІ в хімічній промисловості за призначенням (2024), % (побудовано на підставі даних [14]).

Fig. 7. Segmentation of the global AI market in the chemical industry by purpose (2024), % (built on the basis of data [14]).

Сегмент контролю якості, який має вирішальне значення для дотримання нормативних стандартів, за прогнозами зросте з 1,0 млрд дол. у 2024 році (частка ринку – 28,6 %) до 4,5 млрд дол. у 2035 році, забезпечуючи стабільність та безпеку продукції завдяки передовим методам перевірки на основі ШІ.

Сегмент управління ланцюгами поставок, оцінка якого починається з 0,54 млрд дол. у 2024 році (частка ринку – 15,5 %) за очікуваннями зросте до 1,3 млрд дол. у 2035 році. Він поліпшує управління запасами та прогнозування попиту, даючи змогу компаніям швидко реагувати на зміни ринку та знижувати операційні витрати.

У сукупності всі ці застосування підтверджують значний вплив ШІ на трансформацію операційних структур, стимулюючи зростання та адаптивність у світовому хімічному секторі. Зростання ринку додатково стимулюється досягненнями в технологіях ШІ та постійним прагненням галузі оптимізувати процеси, дотримуватися нормативних вимог та підвищувати ефективність ланцюгів поставок в умовах мінливих ринкових умов і викликів.

Сегментація світового ринку ШІ в хімічній промисловості за кінцевим використанням. Зростання ринку зумовлене збільшеним попитом у різних галузях кінцевого використання, особливо в таких секторах, як нафтохімія, фармацевтика,

сільськогосподарські хімікати та спеціальні хімікати, де технології ШІ відіграють дедалі більшу ключову роль [9, 14]. Фармацевтична промисловість отримує значну користь від ШІ завдяки вдосконаленню процесів розробки та винайдення ліків, оптимізації дослідницьких і розробницьких процесів, а також скороченню часу виведення на ринок [22]. Аналогічно, у сільськогосподарській хімії застосування ШІ підтримує точне землеробство та ефективну боротьбу зі шкідниками, підвищуючи врожайність. Нафтохімічний сектор також використовує ШІ для оптимізації операцій, що дає змогу краще керувати ресурсами та підвищувати операційну ефективність. У сфері спеціальних хімікатів ШІ застосовується для розробки інноваційних продуктів та їх налаштування для задоволення потреб ринку харчових продуктів.

Поточна цифрова трансформація та прагнення до сталого розвитку на світовому ринку хімічних речовин зі штучним інтелектом є критичними чинниками, що формують ці галузі, сприяють інноваціям та створюють привабливі можливості для зацікавлених сторін. Разом ці галузі кінцевого використання становлять значну частину динаміки ринку, впливаючи на траєкторії зростання та сприяючи розвитку процесів хімічного виробництва.

За даними аналітичного звіту [23] сегментацію світового ринку ШІ в хімічній промисловості за кінцевим використанням можна провести за іншими сегментами. Сегмент базових хімікатів і нафтохімікатів отримав найбільшу частку доходу у 2023 році через масштаби та складність його виробничих процесів (рис. 8). Технології ШІ використовують для оптимізації великомасштабних виробничих операцій, підвищення ефективності процесів і зниження витрат у цих секторах. Великий обсяг та значний економічний вплив базових хімікатів і нафтохімікатів роблять інвестиції у штучний інтелект особливо цінними для підвищення продуктивності виробництва. Крім того, ШІ допомагає в управлінні ланцюгами поставок та зменшенні впливу на довкілля, що є критично важливими проблемами для цих галузей. Широке впровадження ШІ в цих сферах наголошує на його значенні для підтримки конкурентоспроможності та операційної досконалості виробництва.

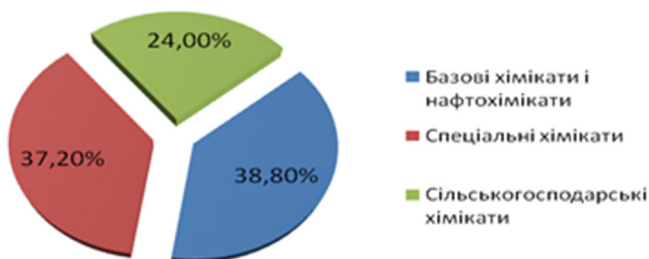


Рис. 8. Сегментація світового ринку ШІ в хімічній промисловості за кінцевим використанням (2023), % (побудовано на підставі даних [23]).

Fig. 8. Segmentation of the global AI market in the chemical industry by end user (2023), % (built on the basis of data [23]).

Прогнозується, що сегмент спеціальних хімікатів значно зросте протягом прогнозованого періоду завдяки збільшеному попиту на передові матеріали, адаптовані для ІІІ та електроніки. Спеціальні хімікати мають вирішальне значення для розробки високопродуктивних підкладок, покриттів і клеїв, використовуваних у виробництві напівпровідників та апаратному забезпеченні ІІІ. Розвиток складних технологій ІІІ потребує використання спеціалізованих хімікатів, які підвищують продуктивність і довговічність електронних компонентів. Компанії інвестують у дослідження та розробки для створення інноваційних хімічних рішень, які відповідають потребам у застосуванні ІІІ, що постійно змінюються. З розвитком технологій ІІІ очікується суттєве зростання попиту на спеціальні хімікати для підтримки цих інновацій.

За прогнозними даними аналітичного звіту [24] сегментацію світового ринку ІІІ в хімічній промисловості за кінцевим використанням можна здійснити за іншими сегментами. Лідерські позиції займали сегмент базових хімікатів та нафтохімікатів з часткою 33,4 % і сегмент спеціальних хімікатів з часткою 26,1 %. Подальні позиції відповідали агрохімікатам і товарним хімікатам (рис. 9).

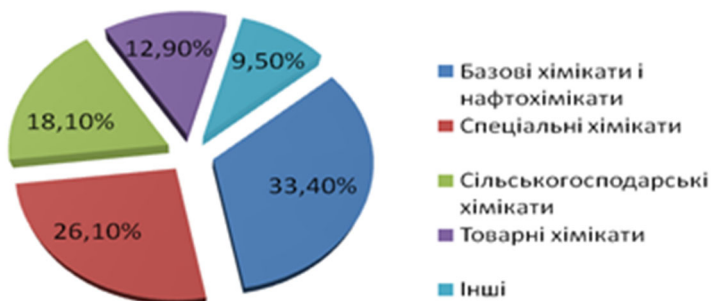


Рис. 9. Сегментація світового ринку ІІІ в хімічній промисловості за кінцевим використанням (2033), % (побудовано на підставі даних [24]).

Fig. 9. Segmentation of the global AI market in the chemical industry by end user (2033), % (built on the basis of data [24]).

Сегментація світового ринку ІІІ в хімічній промисловості за перспективними технологіями. В дослідженнях [5, 6, 9] ринок сегментовано за перспективними технологіями (машинне навчання, обробка природної мови, автоматизація процесів робототехніки, глибоке навчання). Стрімке зростання ринку демонструє стійку траєкторію розвитку технологічних рішень у цьому секторі:

- ✓ ринок переживає значне зростання – це зумовлено підвищеним попитом на автоматизацію та ухвалення рішень на основі даних у хімічній промисловості;

- ✓ машинне навчання відіграє вирішальну роль – воно дає змогу виконувати аналітику, яка оптимізує процеси, що призводить до підвищення ефективності та зниження витрат;
- ✓ важливе значення обробки природної мови – вона сприяє кращій комунікації між системами та операторами, оптимізуючи робочі процеси та підвищуючи загальну продуктивність;
- ✓ життєва важливість автоматизації процесів робототехніки – вона стає незамінною для виконання повторюваних завдань, тим самим звільняючи людські ресурси для виконання складніших завдань;
- ✓ важливість глибокого навчання – воно пропонує нові можливості моделювання, розширюючи спроможності аналізу величезних наборів даних, що є важливим для інновацій у розробці продуктів.

Поєднання цих технологій формує синергетичний підхід, який суттєво трансформує операції на світовому ринку штучного інтелекту в хімічній продукції, зрештою сприяючи загальному зростанню ринку. Оскільки ці технології продовжують розвиватися, то вони надають широкі можливості для компаній, які прагнуть використовувати ШІ для підвищення операційної ефективності й отримання стратегічних переваг.

Обсяги та динаміка світових ринків хімічної продукції та обладнання. На основі даних дослідження [13] можна узагальнити та систематизувати відомості щодо обсягів та динаміки окремих світових ринків хімічної продукції та обладнання (табл. 1).

Таблиця 1.

Обсяги світових ринків продукції та обладнання хімічної промисловості

Table 1.

Volumes of world markets for chemical industry products and equipment

Найменування ринку/продукції	Обсяг, млрд дол. США		ССТЗ в період 2024–2034 років, %
Світовий ринок агрохімікатів	235,86	313,89	2,90
Світовий ринок хімічних сенсорів	24,94	55,36	8,30
Світовий ринок хімічної продукції та приладобудування	61,48	117,59	6,70
Світовий ринок хімічної продукції як послуги	10,28	22,10	7,91
Світовий ринок хімічних каталізаторів	41,29	64,04	4,48
Світовий ринок генеративного штучного інтелекту	323,58	3820,21	28.01
Світовий ринок інтернет речей	84,72	299,51	13,46
Світовий ринок спеціальних хімікатів	904,45	1332,04	3,94
Світовий ринок хімії 4.0	87,52	237,53	10,50

За результатами узагальнення та систематизації видно, що за обсягами ринку провідні місця посідали світові ринки спеціальних хімікатів, генеративного штучного інтелекту, агрохімікатів. Найшвидшими темпами будуть зростати світові ринки генеративного штучного інтелекту, Інтернету речей, хімії 4.0.

Тенденції та можливості світового ринку ШІ в хімічній промисловості

Світовий ринок ШІ в хімічній промисловості спостерігає кілька важливих тенденцій, які формують його майбутнє: визначним рушійним чинником ринку є поштовх до цифрової трансформації; компанії впроваджують технології ШІ для підвищення ефективності процесів, поліпшення розробки продуктів і мінімізації операційних витрат; потреба в більш сталих та екологічно чистих практиках; можливість ухвалення обґрунтованих рішень.

Можливості на світовому ринку ШІ в хімічній промисловості численні, особливо у сфері прогнозного обслуговування та оптимізації ланцюгів поставок. Серед них можна виділити основні:

- використовуючи алгоритми ШІ, компанії можуть поліпшити свої можливості прогновної аналітики, що призведе до скорочення простоїв та підвищення операційної ефективності;
- розробка «розумніших» рецептур і матеріалів, які динамічно реагують на змінні умови, задовольняючи потреби в більш просунутих застосуваннях у різних секторах;
- посилена увага до співпраці між постачальниками технологій і виробниками хімічної продукції, що збільшує дослідницькі та розробницькі зусилля, призводить до інноваційних рішень, адаптованих до конкретних хімічних застосувань;
- зростання інтересу до інтеграції ШІ з іншими новими технологіями, такими як інтернет речей і блокчейн, що призводить до створення синергії, яка може трансформувати операції в галузі;
- зацікавленість дослідників і виробників у виявленні тенденцій та можливостей для сприяння зростанню ринку та інноваціям.

ШІ революціонізує дослідницький ландшафт, відкриваючи безпрецедентні можливості для прискорення відкриттів, поліпшення співпраці та вирішення критичних завдань у таких галузях, як хімія. Він вже продемонстрував свої можливості та перспективи у просуванні хімічних досліджень. Від винайдення ліків до матеріалознавства – реальні програми демонструють, як ці інструменти змінюють спосіб роботи хіміків [25–27]:

- прискорення винайдення ліків – найважливіша роль ШІ у прогнозуванні молекулярних взаємодій, дає змогу значно скорочувати час, необхідний для виявлення життєздатних «кандидатів» на ліки (наприклад, прогнозне моделювання допомогло дослідникам змоделювати хімічні реакції та визначити пріоритетність перспективних сполук без масштабних лабораторних досліджень, це скоротило терміни розробки ліків на ранній стадії до 30 %);
- розробка екологічно чистих матеріалів – використання ШІ для розробки передових матеріалів із певними властивостями, такими як довговічність або екологічність (наприклад, застосування алгоритмів машинного навчання для передбачення поведінки різних молекулярних конфігурацій дає змогу створювати біорозкладані полімери швидше, ніж традиційні методи проб і помилок);
- виявлення прихованих закономірностей – використовуючи величезні набори даних хімічної літератури та експериментальних результатів, ШІ виявив тенденції та кореляції, які інакше могли б залишитися непоміченими

(наприклад, використання ІІІ для аналізу даних про хімічні реакції за тривалий період виявляє оптимізовані шляхи для ефективнішого синтезу складних молекул);

- підвищення ефективності функціонування лабораторій – автоматизація на основі ІІІ оптимізувала рутинні, але трудомісткі процеси, такі як аналіз даних спектроскопії або сортування тисяч хімічних рефератів; це дозволяє зосередитися на високоцінних інноваційних завданнях, делегуючи повторювану роботу системам ІІІ.

Ці зміни способів роботи та приклади демонструють як інструменти ІІІ не тільки прискорюють робочі процеси, а й забезпечують прориви, які раніше були недоступні. Для осіб, які ухвалюють рішення, це наголошує на важливості інвестування в підходи, керовані ІІІ, що відповідають меті інституційних досліджень.

ІІІ сприяє кардинальному перетворенню хімічної промисловості, аналітики прогнозують, що його вплив перевершить навіть вплив Інтернету. Від алгоритмів, які прискорюють молекулярний дизайн, до автоматизованих лабораторій, які підвищують швидкість і точність експериментів, ІІІ трансформує засоби, прийоми та методи, якими хіміки розв'язують складні проблеми. Його вплив поширюється на винайдення нових матеріалів, оптимізацію реакцій і зусилля в напрямі сталого розвитку, що робить його незамінною силою в сучасній хімії. В дослідженнях [5, 6, 8, 9, 26] узагальнено найперспективніші технології на основі ІІІ, які в майбутньому виконають суттєві перетворення в хімії:

- *розробка нових лікарських препаратів* – використання машинного навчання для перегляду величезних наборів даних з хімічних, біологічних і медичних джерел; прогнозування взаємодії різних хімічних структур з біологічними мішенями з визначенням потенційних майбутніх ліків швидше, ніж за допомогою традиційних методів [27, 28];
- *аналіз значного обсягу даних* – сприяє консолідуванню фрагментованих даних з експериментів, симуляцій і літератури в інтегровану систему; інтегровані хімічні дані можуть прискорити прогрес у хімічній промисловості, використовуючи всебічний аналіз даних та міждисциплінарні дослідження [29, 30];
- *впровадження автоматизованих лабораторних платформ* – використання робототехніки, програмного забезпечення та ІІІ для проведення експериментів мінімізує людські помилки, підвищує точність і відтворюваність; системи на основі ІІІ можуть виконувати складні синтетичні завдання, а також високопродуктивний скринінг у винайденні ліків і матеріалознавстві; використання ІІІ дає змогу цим платформам аналізувати дані в режимі реального часу, оптимізувати експериментальні умови та ухвалювати рішення на основі даних; обробка небезпечних матеріалів та оптимізація використання ресурсів підвищують безпеку хімічних досліджень [31, 32];
- *інтеграція лабораторних приладів та інтернету речей* – інтеграція дає змогу виконувати автоматизований збір даних, моніторинг у режимі реального часу та безперебійну аналітику даних; вона також сприяє різним застосуванням від моніторингу безперервного синтезу ліків у фармацевтиці до моніторингу речовин-забрудників у реальному часі в екології [33, 34];

- *використання ШІ у спектроскопії та розробці аналітичних методів* – алгоритми машинного навчання вчать на великих наборах даних спектроскопічних вимірювань та їх відповідних інтерпретацій; ці алгоритми потім навчаються розпізнавати складні взаємозв'язки між спектроскопічними характеристиками та хімічними властивостями, що зменшує час, необхідний для аналізу даних; спектроскопія з використанням ШІ може швидко виявляти забрудники у фармацевтичних речовинах, забезпечуючи якість лікарських засобів, та у моніторингу навколишнього середовища, виявляючи слідові кількості забрудників у складних сумішах [35–38];
- *застосування блокчейну для оптимізації ланцюгів постачання* – дає змогу нівелювати суттєві виклики ланцюгів постачання хімічної промисловості (неефективне управління запасами та фрагментованими розподільними мережами); використання технології розподіленого реєстру дає змогу записати як блок даних кожен транзакцію в ланцюзі постачання [39–42];
- *використання технологій цифрового двійника* – застосування віртуальних моделей сприяє точному відображенню реальних хімічних реакцій, процесів або систем у реальному часі; забезпечує інтеграцію даних з датчиків, показників продукції з імітацією фізичної та хімічної поведінки її аналогів; оптимізацію та моделювання зміни параметрів у хімічних процесах без ризиків або витрат на фізичні експерименти завдяки використанню цифрових двійників; прогнозування відмови обладнання з поліпшенням стратегії безпеки та сприянням стрес-тестуванню [43, 44];
- *доповнена реальність і віртуальні лабораторії* – віртуальні лабораторії охоплюють симуляції та цифрові інструменти з відтворюванням реальних експериментів, допомагаючи варіювати змінні та спостерігати результати в реальному часі у навчальному процесі; цей сучасний підхід до навчання зменшує витрати, поліпшує безпеку та дає змогу проводити повторні випробування, роблячи навчання гнучкішим і доступнішим; також сприяючи його інклюзивності [45, 46];
- *обробка природної мови в хімічному просторі* – застосування ШІ для аналізу і отримання корисних даних з великих обсягів наукової літератури, патентів і хімічних баз даних; обробка природної мови перетворює неструктурований текст на структуровані дані для ефективнішого тлумачення з виявленням прихованих зв'язків і закономірностей у науковій літературі, які можуть бути непомітні під час звичайного читання; у фармацевтиці обробка природної мови допомагає у винайденні та розробці ліків, одержуючи інформацію про біоактивні сполуки, мішені та терапевтичні ефекти [47, 48];
- *прогнозна токсикологія* – комп'ютерні моделі можуть бути використані для прогнозування токсичності хімічних сполук і запобігання їхнього негативного впливу на здоров'я й навколишнє середовище ще до виникнення такого впливу; цей підхід поліпшує оцінки хімічної безпеки під час розробки лікарських засобів та агрохімікатів зі зниженням ризику дороговартісних невдач на пізніх етапах; сучасні технології, такі як машинне навчання і багатоваріантні зважені кольорові графі, поліпшують точність прогнозів токсичності, що дає змогу безпечніше проєктувати хімічні сполуки і зменшити залежність від тестування на тваринах [49, 50];

- *використання ІІІ у зеленій хімії* – цифрові платформи сприяють точному моделюванню дисперсії забрудників та ідентифікації джерел забруднення; інтегруючи обчислювальні моделі, аналітику даних і технології дистанційного зондування, ІІІ може забезпечити моніторинг якості повітря та води в реальному часі, складу ґрунту та накопичення небезпечних речовин; цей підхід може поліпшити екологічний моніторинг і контроль за забрудненням; цифрові інструменти також можуть підтримувати винайдення екологічно чистих матеріалів, енергоефективних процесів і технологій мінімізації відходів [51, 52];
- *молекулярний дизайн* – алгоритми ІІІ здатні використовувати величезні обсяги хімічних даних, враховуючи молекулярні структури, їх асоційовані характеристики й експериментальні результати, для визначення взаємозв'язків між молекулярними структурами та прогнозування їхньої поведінки; машинне навчання може прискорити винайдення лікарських засобів з поліпшеною ефективністю та меншою побічною дією, спрямовувати розробку ефективних енергетичних матеріалів для сонячних батарей і акумуляторів, а також сприяти сталим практикам, створюючи перероблювальні матеріали [53, 54];
- *розумне управління* – інтелектуальні системи управління використовують розвинені алгоритми, датчики й автоматизаційні технології для поліпшення ефективності та безпеки в хімічних процесах; застосовуючи моніторинг параметрів процесу в режимі реального часу та корекцію даних на його основі, ці системи оптимізують складні хімічні реакції, зменшуючи відходи та споживання енергії, без потреби в постійному контролі з боку людини; ці системи також підвищують безпеку, виявляючи небезпеки і даючи змогу проводити прогностичне обслуговування для запобігання витратним зупинкам [55, 56];
- *прогнозування зв'язків структура-активність за допомогою глибокого навчання* – ці системи з використанням навчання нейронних мереж на великих наборах даних можуть розпізнавати складні патерни в молекулярних структурах, які корелюють з біологічними результатами, виходячи за межі традиційних методів аналізу; глибоке навчання може прогнозувати ефективність потенційних ліків, передбачати небажані реакції та пропонувати структурні модифікації для оптимізації провідних сполук, допомагаючи винайденню нових ліків; ці моделі можуть надавати уявлення про біологічні шляхи для глибшого розуміння процесів захворювань і фармакології, виявлення нових терапевтичних мішеней [57, 58];
- *експерименти високої пропускнуої здатності на основі ІІІ* – об'єднують робототехніку, автоматизацію й ІІІ для одночасного та швидкого проведення кількох хімічних експериментів; системи високої пропускнуої здатності можуть аналізувати тисячі зразків щодня, мінімізуючи людську помилку і даючи змогу дослідникам зосередитися на складніших аспектах їхньої роботи; завдяки прискоренню проведення експериментів та аналізів скорочуються цикли НДДКР для нових хімікатів, матеріалів та ліків; що генерує великі набори даних, які можуть збагачувати обчислювальний аналіз і поліпшувати прогностичні можливості ІІІ [59, 60];

- *дизайн цифрових матеріалів та інформатика матеріалів* – аналізуючи великі набори даних про властивості матеріалів, умови обробки та показники продуктивності, ШІ може прогнозувати продуктивність матеріалів на основі їхньої структури та складу; цей підхід прискорює виявлення високопродуктивних матеріалів для критично важливих застосувань в аерокосмічній галузі, енергетиці та електроніці, що призводить до кращих рішень [61, 62];
- *ШІ для оптимізації хімічних реакцій* – за допомогою збору та аналізу даних про хімічні реакції, зокрема про реагенти, каталізатори, розчинники, температури та виходи, ШІ може прогнозувати результати реакцій та уточнювати хімічні умови; це дає змогу хімікам віртуально моделювати реакції, заощаджуючи час та ресурси, орієнтуючись на найперспективніші умови перед тестуванням реакцій у лабораторії; цей підхід застосовний у синтетичній хімії, матеріалознавстві та винайденні лікарських засобів, підвищуючи вихід і селективність у складному органічному синтезі та спрощуючи виробництво активних фармацевтичних інгредієнтів [63, 64];
- *автоматизоване планування синтезу* – використовуючи алгоритми машинного навчання, автоматизовані системи планування синтезу аналізують величезні бази даних хімічних реакцій успішних і невдалих, щоб запропонувати і рейтингувати кілька синтетичних маршрутів; враховуючи такі чинники, як необхідні етапи, доступність матеріалів і вартість, ці системи виявляють найбільш перспективні та практичні стратегії, які особливо цінні в розробці лікарських засобів, де час є критичним [65, 66];
- *хімічна інформатика* – об'єднує методи машинного навчання для управління великими наборами хімічних даних, перетворюючи сирі дані на дієві висновки; ШІ може бути використаний для виявлення шаблонів у хімічних структурах, властивостях і біологічній активності, спростивши віртуальний скринінг у винайденні ліків та матеріалів; прогнознi моделі ШІ можуть передбачати хімічні властивості з високою точністю, що сприяє розвитку нових технологій і рішень у численних наукових дисциплінах [67–69];
- *ШІ у квантовій хімії* – квантово-хімічні розрахунки можуть бути дуже складними й вимогливими до обчислювальних ресурсів; навчання моделей ШІ на основі квантової хімії та молекулярних симуляцій дає змогу дослідникам зменшити обчислювальні витрати та час, одночасно надаючи глибше розуміння фундаментальних молекулярних явищ, враховуючи механізми реакцій і поведінку матеріалів, які раніше були недоступні [70, 71].

Використання ШІ хімічними компаніями є природним наслідком їхнього прагнення до Промисловості 4.0, яка передбачає розвиток і злиття автоматизованого виробництва, обміну даних і виробничих технологій в єдину саморегульовану систему, з мінімальним втручанням людини у виробничий процес. Незаперечно, що високооцифровані компанії можуть легко отримати доступ до широкої клієнтської бази по всьому світу, що призводить до збільшення можливостей для масштабування їхнього бізнесу. Підвищення рівня автоматизації виробничих процесів, цифровізація та сучасні парки машин і обладнання є важливими для підвищення стійкості підприємств до криз та змін на ринках. Використання рішень

III в бізнес-процесах стає все поширенішим, а спектр застосувань і переваг, що виникають внаслідок їхнього впровадження у виробничі процеси, викликає все більший інтерес серед компаній.

Для переважної більшості це лише початок змін, які революціонізують галузь найближчим часом. З іншого боку, використання III все ще викликає низку ризиків і суперечок серед працівників. За даними [8] у табл. 2 наведено основні переваги та недоліки використання III у виробничих процесах хімічними компаніями у різних промислових і соціальних категоріях.

Таблиця 2.

Основні переваги та недоліки використання III у виробничих процесах хімічними компаніями у різних промислових і соціальних категоріях [8]

Table 2.

Main advantages and disadvantages of using AI in production processes by chemical companies in different industrial and social categories [8]

Категорія	Тип	
	переваги	недоліки
Економічні	Економія внаслідок оптимізації процесів; збільшення прибутку від продажів; запобігання накопиченню надлишкових запасів	Капіталомісткість; невизначеність повернення інвестицій
Технічні	Підвищення ефективності пристроїв; поліпшення якості продукції	Безпека даних; вразливість до кібератак
Соціальні	Усунення людських помилок; поліпшення безпеки працівників	Страх втратити роботу; захист конфіденційності; брак спеціалізованих знань; етичні міркування
Екологічні	Зменшення кількості післявиробничих відходів; зниження споживання енергії; інструмент, який дає змогу досягти мети EZL (Європейської зеленої угоди)	Збільшення вуглецевого сліду
Дослідження та розробки	Прискорення інноваційних процесів; стимулювання розробки нових продуктів та послуг	Залежність від технологій

Підсумовуючи, III має потенціал для революціонування хімічної промисловості, але важливо враховувати ризики та проблеми, пов'язані з його впровадженням. До них належать потенційні людські помилки, втрата робочих місць, конфіденційність даних і безпека. Однак за умови вжиття належних заходів можна досягти таких переваг: підвищення ефективності, продуктивності, безпеки та сталого розвитку. Щоб максимізувати переваги та мінімізувати ризики, у хімічній промисловості варто розглянути поетапний підхід до впровадження III, починаючи з пілотних проєктів та поступово збільшуючи масштаби.

Висновки

Хімічні речовини є невід'ємною частиною різних галузей промисловості та повинні бути одержані оптимальним шляхом для підтримки ефективності та продуктивності. Впровадження штучного інтелекту в хімічну промисловість здійснило революцію, надаючи послуги автоматизації, аналізу даних, оптимізації процесів тощо. Всі важливі «гравці» ринку хімічної індустрії впроваджують штучний інтелект у свою діяльність.

ЛІТЕРАТУРА

1. Artificial Intelligence in Society, OECD Publishing, Paris, 2019. <https://doi.org/10.1787/eedfee77-en>.
2. Top 20 Applications of Artificial Intelligence (AI) in 2025. <https://www.geeksforgeeks.org/applications-of-ai/>.
3. *Malyshev V., Gab A., Shakhnin D., Lipsky Y.* Research of the Global Higher Education Market and of the Use of Artificial Intelligence in this Field. EUREKA: Social and Humanities. 2024. No. 5. P. 28–41. <https://doi.org/10.21303/2504-5571.2024.003663>.
4. *Malyshev V., Lipskyi Y., Kovalenko V., Gab A., Shakhnin D., Orel O.* Assessment of the Global Artificial Intelligence Market in Healthcare. Technology Audit and Production Reserves. 2024. No. 6/4 (80). P. 62–70. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.316451>.
5. *Ding H., Hua P., Huang Z.* Survey on Recent Progress of AI for Chemistry: Methods, Applications, and Opportunities. arXiv:2502.17456v1 [physics.chem-ph] <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.17456>.
6. *Baum Z. J., Yu X., Ayala P. Y., Zhao Y., Watkins S. P., Zhou Q.* Artificial Intelligence in Chemistry: Current Trends and Future Directions. J. Chem. Inf. Model. 2021. Vol. 61(7). P. 3197–3212. <https://doi.org/10.1021/acs.jcim.1c00619>.
7. *Lin S., Krishnan V., Womack D.* Optimizing the chemicals value chain with AI. IBM Institute for Business Value. 2020. 59035359USEN-00. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/chemicals-value-chain-ai>.
8. *Laska M., Karwala I.* Artificial intelligence in the chemical industry – risks and opportunities. Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series. 2023. No. 172. P. 403–416. <http://doi.org/10.29119/1641-3466.2023.172.25>.
9. How AI is transforming chemistry research. <https://www.chemistryworld.com/research/how-ai-is-transforming-chemistry-research/4020650.article>.
10. Insights 2024: Attitudes toward AI. Elsevier. 2024. <https://www.elsevier.com/insights/attitudes-toward-ai>.
11. *Shen R., Su W.* Review of the Applications of AI in the Process Analysis and Optimization of Chemical Products. Pharmaceutical Fronts. 2023. Vol. 5(4). e219. <https://doi.org/10.1055/s-0043-1777425>.
12. Roles of generative AI in drug discovery: advantages, case studies, and examples. <https://www.geeksforgeeks.org/roles-of-generative-ai-in-drug-discovery-advantages-case-studies-and-examples/>.
13. AI in Chemicals Market Size to Reach USD 28 Billion by 2034. 2025. <https://www.globenewswire.com/news-release/2025/02/20/3029322/0/en/AI-in-Chemicals-Market-Size-to-Rich-USD-28-Billion-by-2034.htm>
14. *Dhapte A.* AI in Chemicals Market Research Report By Application (Process Optimization, Predictive Maintenance, Quality Control, Supply Chain Management), By Technology

- (Machine Learning, Natural Language Processing, Robotics Process Automation, Deep Learning), By End Use Industry (Petrochemical, Pharmaceutical, Agricultural Chemicals, Specialty Chemicals), By Deployment Type (On-Premises, Cloud-Based, Hybrid) and By Regional (North America, Europe, South America, Asia Pacific, Middle East and Africa) - Forecast to 2035. 2025. MRFR/ICT/20607-HCR. <https://www.marketresearchfuture.com/reports/ai-in-chemicals-market-22207>.
15. AI in Chemicals Market Size, Share & Trends Analysis Report by Type (Hardware, Software, and Services), Application (Molecule Design, Retrosynthesis, Reaction Outcome Prediction, Reaction Conditions Prediction, and Chemical Reaction Optimization), End-Use (Base Chemicals and Petrochemicals, Specialty Chemicals, and Agrochemicals), and By Region (North America, Europe, APAC, Middle East and Africa, LATAM) Forecasts, 2025–2033. 2025. <https://stratisticsresearch.com/report/artificial-intelligence-in-chemicals-market>.
 16. Artificial Intelligence (AI) in Chemicals Market Size, Share, Report 2025 to 2034. Market Research Reports, Cervicorn Consulting, 2025, Report Code: 2361. <https://www.cervicornconsulting.com/artificial-intelligence-ai-in-chemicals-market>.
 17. Artificial Intelligence (AI) Market Size, Share, and Trends 2025 to 2034. ICT, Precedence Research, 2025, Report Code: 1635. <https://www.precedenceresearch.com/artificial-intelligence-market>.
 18. Artificial Intelligence (AI) Software Market Size: 2024 to 2030. ABI Research, 2025, MD-AISOFT-103. <https://www.abiresearch.com/news-resources/chart-data/report-artificial-intelligence-market-size-global>.
 19. AI Data Management Market Size, Share & Trends Analysis Report By Deployment, By Offering, By Data Type, By Application, By Technology, By Vertical (BFSI, Retail & E-commerce), By Region, And Segment Forecasts, 2024 – 2030. Grand View Research, 2025, Report ID: GVR-4-68040-355-0. (<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/ai-data-management-market-report>).
 20. Data Science Platform Market Size, Share, and Trends 2024 to 2034. Precedence Research, 2024, Report Code: 2030. <https://www.precedenceresearch.com/data-science-platforms-market>.
 21. Laboratory Informatics Market Size, Share, and Trends 2025 to 2034. Precedence Research, 2025, Report Code: 1536. <https://www.precedenceresearch.com/laboratory-informatics-market>.
 22. *Serrano D. R., Luciano F. C., Anaya B. J., Ongoren B., Kara A., Molina G., Ramirez B. I., Sánchez-Guirales S. A., Simon J. A., Tomietto G., Rapti C., Ruiz H. K. Rawat S., Kumar D., Lalatsa A.* Artificial Intelligence (AI) Applications in Drug Discovery and Drug Delivery: Revolutionizing Personalized Medicine. *Pharmaceutics*. 2024. Vol. 16(10). 1328. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics16101328>.
 23. AI In Chemicals Market Size, Share & Trends Analysis Report By Type (Hardware, Software, Services), By Application (Production Optimization, New Material Innovation), By End-use, By Region, And Segment Forecasts, 2024 – 2030. Grand View Research, 2025, Report ID: GVR-4-68040-444-9. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/ai-chemicals-market-report>.
 24. Artificial Intelligence (AI) in Chemicals Market By Type (Software, Hardware, and Services), By Technology, By Application, By End User - Global Industry Outlook, Key Companies (Manuchar N.V, IMCD N.V., Univar Solutions Inc., and Others), Trends and Forecast 2024-2033. Dimension Market Research, 2024, Report Code: RC-897. <https://dimensionmarketresearch.com/report/artificial-intelligence-in-chemicals-market/>.
 25. *Granda J. M., Donina L., Dragone V., Long D.-L., Cronin L.* Controlling an organic synthesis robot with machine learning to search for new reactivity. *Nature*. 2018. Vol. 559. P. 377–381. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0307-8>.

26. *Dabas R.* Twenty ways AI is advancing chemistry. *Chemistry World*, 2024. <https://www.chemistryworld.com/news/twenty-ways-ai-is-advancing-chemistry/4020269.article>.
27. *Dhudum R., Ganeshpurkar A., Pawar A.* Revolutionizing Drug Discovery: A Comprehensive Review of AI Applications. *Drugs Drug Candidates*. 2024. Vol. 3. P. 148–171. <https://doi.org/10.3390/ddc3010009>.
28. *Ferreira F. J. N., Carneiro A. S.* AI-Driven Drug Discovery: A Comprehensive Review. *ACS Omega*. 2025. Vol. 10. P. 23889–23903. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c00549>.
29. *Tetko I. V., Engkvist O.* From Big Data to Artificial Intelligence: chemoinformatics meets new challenges. *J. Cheminform.* 2020. Vol. 12. Article number: 74. <https://doi.org/10.1186/s13321-020-00475-y>.
30. *Ottah D., Ngwu C.* An Overview Of AI And Big Data Analytics In Revolutionizing Chemistry. Maiden AbiaChem Conference. 2024.
31. *Jiang X., Luo S., Liao K., Jiang S., Ma J., Jiang J., Shuai Z.* Artificial intelligence and automation to power the future of chemistry. *Cell Reports Physical Science*. 2024. Vol. 7. P. 102049. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2024.102049>.
32. *Bai J., Cao L., Mosbach S., Akroyd J., Lapkin A.A., Kraft M.* From Platform to Knowledge Graph: Evolution of Laboratory Automation. *JACS Au*. 2022. Vol. 2. P. 292–309. <https://doi.org/10.1021/jacsau.1c00438>.
33. *Palanisami G.* IoT in Chemistry Practical's. *LimkedIn*. 2024. <https://www.linkedin.com/pulse/iot-chemistry-practicals-ganeshkumar-palanisamy-qb4nc>.
34. *Kreitlein S.* Integrating AI: How to Incorporate Artificial Intelligence Into the Laboratory of the Future. 2024. <https://www.labcompare.com/10-Featured-Articles/613922-Integrating-AI-How-to-Incorporate-Artificial-Intelligence-into-the-Laboratory-of-the-Future/>.
35. *Cardoso R. R.* AI in analytical chemistry: Advancements, challenges, and future directions. *Talanta*. 2024. Vol. 274. Article 125949. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2024.125949>.
36. The role of Artificial Intelligence (AI) in Analytical Chemistry. *EVISA*. 2025. <https://speciation.net/News/The-role-of-Artificial-Intelligence-AI-in-Analytical-Chemistry-;~2025/02/12/10907.html>.
37. *Guo K., Shen Y., Gonzalez-Montiel G. A., Huang Y., Zhou Y., Surve M., Guo Z., Das P., Chawla N. V., Wiest O., Zhang X.* Artificial Intelligence in Spectroscopy: Advancing Chemistry from Prediction to Generation and Beyond. *cs.AI arXiv:2502.09897*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.09897>.
38. *Workman Jr. J., Mark H.* Artificial Intelligence in Analytical Spectroscopy, Part II: Examples in Spectroscopy. *Spectroscopy*. 2023. Vol. 38. P. 10–15. <https://doi.org/10.56530/spectroscopy.js8781e3>.
39. *Choi N., Kim H.* Technological Convergence of Blockchain and Artificial Intelligence: A Review and Challenges. *Electronics*. 2025. Vol. 14. Article 84. <https://doi.org/10.3390/electronics14010084>.
40. *Taherdoost H.* Blockchain Technology and Artificial Intelligence Together: A Critical Review on Applications. *Appl. Sci*. 2022. Vol. 12. Article 12948. <https://doi.org/10.3390/app122412948>.
41. Artificial Intelligence and Blockchain: Insights and Actions for the Chemical Industry. *CEFIC*. 2019. <https://cefic.org/resources/artificial-intelligence-and-blockchain-insights-and-actions-for-the-chemical-industry/>.
42. *Mitra S. M., D'Costa J. A., Sami M. M., Nibir M. M. H., Rahman M. A.* Secure Blockchain and AI-Based Decision Making for Chemical Supply Chain Management. 2024 International Conference on Advances in Computing, Communication, Electrical, and Smart Systems (iCACCESS), Dhaka, Bangladesh. 2024. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/iCACCESS61735.2024.10499490>.

43. *Peterson L., Gosea I. V., Benner P., Sundmacher K.* Digital twins in process engineering: An overview on computational and numerical methods. SSRN. 2024. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4747265>.
44. *Mane S., Dhote R. R., Sinha A., Thirumalaiswamy R.* Digital twin in the chemical industry: A review. *Digital Twin and Applications*. 2024. Vol. 1. P. 118–130. <https://doi.org/10.1049/dgt2.12019>.
45. *Lampropoulos G.* Combining Artificial Intelligence with Augmented Reality and Virtual Reality in Education: Current Trends and Future Perspectives. *Multimodal Technol. Interact*. 2025. Vol. 9. Article 11. <https://doi.org/10.3390/mti9020011>.
46. *von Ende E., Ryan S., Crain M. A., Makary M.S.* Artificial Intelligence, Augmented Reality, and Virtual Reality Advances and Applications in Interventional Radiology. *Diagnostics*. 2023. Vol. 13. Article 892. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13050892>.
47. *Ramos M. C., Collison C. J., White A. D.* A review of large language models and autonomous agents in chemistry. *Chem. Sci*. 2025. Vol. 16. P. 2514–2572. <https://doi.org/10.1039/D4SC03921A>.
48. *Thorne C., Akhondi S.* NLP for Chemistry – Introduction and Recent Advances. In: *Proceedings of the 2024 Joint International Conference on Computational Linguistics, Language Resources and Evaluation (LREC-COLING 2024): Tutorial Summaries*. Torino, Italia. ELRA and ICCL. 2024. P 45–49. <https://aclanthology.org/2024.lrec-tutorials.8/>.
49. *Yingngam B.* Chapter 5. AI in Predictive Toxicology. In: *AI-Powered Advances in Pharmacology*. IGI Global, 2025. P. 56. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-3212-2.ch005>.
50. *Masarone S., Beckwith K. V., Wilkinson M. R., Tuli S., Lane A., Windsor S., Lane J., Hosseini-Gerami L.* Advancing predictive toxicology: overcoming hurdles and shaping the future. *Digital Discovery*. 2025. Vol. 4. P. 303–315. <https://doi.org/10.1039/D4DD00257A>.
51. *Valavanidis A.* Artificial Intelligence and Green Chemistry. High-impact synergies between green chemistry fields and artificial intelligence. 2024. Vol. 1. P. 1–38 https://www.researchgate.net/publication/381377427_Artificial_Intelligence_and_Green_Chemistry_High-impact_synergies_between_green_chemistry_fields_and_artificial_intelligence.
52. *Ghasemlou M., Nguyen H. C., Talekar S., Pfeffer F. M., Barrow C. J.* Artificial Intelligence (AI) for More Sustainable Chemistry and a Greener Future. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2025. Vol. 13. P. 3830–3833. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5c00853>.
53. *Joshi R. P., Kumar N.* Artificial Intelligence for Autonomous Molecular Design: A Perspective. *Molecules*. 2021. Vol. 26. Article 6761. <https://doi.org/10.3390/molecules26226761>.
54. *Weiser B.* Artificial intelligence for molecular design. A Bachelor thesis submitted to Carleton University, Ottawa, Ontario, Canada, 2025. www.researchgate.net/publication/350710022_ARTIFICIAL_INTELLIGENCE_FOR_MOLECULAR_DESIGN.
55. *Park J., Kang D.* Artificial Intelligence and Smart Technologies in Safety Management: A Comprehensive Analysis Across Multiple Industries. *Appl. Sci*. 2024. Vol. 14. Article 11934. <https://doi.org/10.3390/app142411934>.
56. *Singer G., Cohen Y.* A framework for smart control using machine-learning modeling for processes with closed-loop control in Industry 4.0. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2021. Vol. 102. Article 104236. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2021.104236>.
57. *Ma J., Sheridan R. P., Liaw A., Dahl G. E., Svetnik V.* Deep Neural Nets as a Method for Quantitative Structure–Activity Relationships. *J. Chem. Inf. Model*. 2015. Vol. 55. P. 263–274. <https://doi.org/10.1021/ci500747n>.
58. *Matsuzaka Y., Uesawa Y.* Computational Models That Use a Quantitative Structure–Activity Relationship Approach Based on Deep Learning. *Processes*. 2023. Vol. 11. Article 1296. <https://doi.org/10.3390/pr11041296>.

59. Ma Z., Cui P., Wang X., Li L., Xu H., Fisher A., Cheng D. The integration of artificial intelligence and high-throughput experiments: an innovative driving force in catalyst design. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2025. Vol. 84. P. 117–132. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2025.04.012>.
60. Callaghan S. Toward machine learning-enhanced high-throughput experimentation for chemistry. *Patterns* (New York, N.Y.). 2021. Vol. 2. Article 100221. <https://doi.org/10.1016/j.patter.2021.100221>.
61. Jain D., Dwadasi B. S., Kumar D., Mishra S., Ravikumar B., Gupta R., Srinivasan S. G., Jain V., Mynam M., Maiti S., Rai B. Materials Design in Digital Era: Challenges and Opportunities. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2019. Vol. 72. P. 1–10. <https://doi.org/10.1007/s12666-019-01702-3>.
62. Papadimitriou I., Gialampoukidis I., Vrochidis S., Kompatsiaris I. AI methods in materials design, discovery and manufacturing: A review. *Computational Materials Science*. 2024. Vol. 235. Article 112793. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2024.112793>.
63. Shen R., Su W. A Review of the Applications of Artificial Intelligence in the Process Analysis and Optimization of Chemical Products. *Pharmaceutical Fronts*. 2023. Vol. 05. P. e219–e226. <https://doi.org/10.1055/s-0043-1777425>.
64. He C., Zhang C., Bian T., Jiao K., Su W., Wu K.-J., Su A. A Review on Artificial Intelligence Enabled Design, Synthesis, and Process Optimization of Chemical Products for Industry 4.0. *Processes*. 2023. Vol. 11. Article 330. <https://doi.org/10.3390/pr11020330>.
65. Thakkar A., Watson T. J., Johansson S., Jorner K. Artificial intelligence and automation in computer aided synthesis planning. *Reaction Chemistry & Engineering*. 2021. Vol. 6. P. 27–51. <https://doi.org/10.1039/D0RE00340A>.
66. Shen Y., Borowski J. E., Hardy M.A., et al. Automation and computer-assisted planning for chemical synthesis. *Nat. Rev. Methods Primers*. 2021. Vol. 1. Article 23. <https://doi.org/10.1038/s43586-021-00022-5>.
67. Stefaniu A., Rasul A., Hussain G. *Cheminformatics and its Applications*. IntechOpen. 2020. Vol. 1. <https://doi.org/10.5772/intechopen.83236>.
68. de Jesus P. *Cheminformatics: The Digital Revolution in Chemistry*. ChemCopilot. 2025. <https://www.chemcopilot.com/blog/cheminformatics>.
69. Saifi I., Bhat B. A., Hamdani S. S., Bhat U. Y., Lobato-Tapia C. A., Mir M. A., Dar T. U. H., Ganie S. A. Artificial intelligence and cheminformatics tools: a contribution to the drug development and chemical science. *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*. 2024. Vol. 42. P. 6523–6541. <https://doi.org/10.1080/07391102.2023.2234039>.
70. Huan L. Original review of quantum chemistry and 3D modeling of artificial intelligence. *Journal of Quantum Physics and Materials Chemistry*. 2023. Vol. 11. <https://doi.org/10.58473/JQPMC0013>.
71. Swayne M. Study Introduces an AI Agent That Automates Quantum Chemistry Tasks from Natural Language Prompts. *QuantumInsider*. 2025. <https://thequantuminsider.com/2025/05/07/study-introduces-an-ai-agent-that-automates-quantum-chemistry-tasks-from-natural-language-prompts/>.

SUMMARY

Viktor MALYSHEV¹, Yurii LIPSKYI², Angelina GAB¹, Dmytro SHAKHNIN¹

GLOBAL MARKET FOR ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE CHEMICAL INDUSTRY

¹*PrHEI «International European University»,
42B Akad. Hlushkov Ave., 03187 Kyiv, Ukraine
email: viktor.malyshev.igic@gmail.com*

²*National Academy of Statistics, Accounting and Audit
1 Pidhirna Str., 04107 Kyiv, Ukraine
e-mail: lipskyi@mineralis.com.ua*

The object of the study is a general characteristic of the global market for artificial intelligence in the chemical industry.

It is shown that enterprises and institutions of the chemical industry are increasingly using artificial intelligence for business and scientific research. Artificial intelligence is finding more and more ways to apply it in the chemical industry through the use of predictive analytics to predict possible dangers and proactively reduce them and create a realistic virtual reality experience that simulates dangerous situations. The areas of implementation of artificial intelligence in this area are research and development, production, forecasting and planning, risk management. An analysis of scientific publications on the market for artificial intelligence in the chemical industry indicates its significant integration into chemical production processes. The market is forecast to grow at an average annual compound growth rate of 32 % in the period from 2025 to 2034.

The method of searching for literary data and the method of analysis were used to conduct marketing analysis. The global market for artificial intelligence in the chemical industry was valued at USD 1.78 billion in 2024 and is estimated to be USD 2.29 billion in 2025. It is projected to reach approximately USD 28 billion by 2034, growing at a CAGR of 32 % during the period from 2025 to 2034. Key findings regarding the market status in 2024: North America dominated the market with a revenue share of 39.4 %; by end-use, the services segment held the largest market share of 40.2 %; by application, the basic chemicals and petrochemicals segment held the largest market share of 57.5 %; by application, the other segment held the largest market share of 30.2 %.

The volumes and dynamics of the global markets for chemical products (agrochemicals, chemical products, catalysts, specialty chemicals), equipment (sensors, instrument making), and the Internet of Things were assessed.

Keywords: artificial intelligence, chemical industry, global market, segment analysis, trends.

Стаття надійшла: 16.06.25.
Після доопрацювання: 24.06.25.
Прийнята до друку: 26.09.25.