

# НАУКОВІ ВІСТІ КПІ

Міжнародний науково-технічний журнал

№ 1–4 (137)

2024

Започаткований у вересні 1997 року

Головний редактор  
М. З. Згуровський, акад. НАН України

Заступник головного редактора  
М. Ю. Ільченко, акад. НАН України

Відповідальний секретар  
П. П. Маслянко, канд. техн. наук, доц.

## У номері:

Електронні комунікації

Інформаційні технології,  
системний аналіз  
та керування

Матеріалознавство  
та машинобудування

Прикладна математика

Хімічні технології  
та інженерія

Адреса редакції:  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
просп. Берестейський, 37  
Київ, 03056, Україна  
Тел. (+38 044) 204-94-53  
E-mail: [n.visti@kpi.ua](mailto:n.visti@kpi.ua)  
<http://scinews.kpi.ua>

Засновник – Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

Внесений до реєстру суб'єктів у сфері медіа з присвоєнням ідентифікатора медіа R30-02405  
(рішення Національної ради з питань телебачення і радіомовлення № 1794 від 21.12.2023)

Згідно з наказами МОН України № 1643 від 28.12.2019, № 409 від 17.03.2020 та № 392 від 05.04.2023 журнал включено до категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України з технічних наук (спеціальності – 113 Прикладна математика, 121 Інженерія програмного забезпечення, 122 Комп'ютерні науки, 123 Комп'ютерна інженерія, 124 Системний аналіз, 131 Прикладна механіка, 132 Матеріалознавство, 133 Галузеве машинобудування, 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка, 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, 142 Енергетичне машинобудування, 143 Атомна енергетика, 144 Теплоенергетика, 161 Хімічні технології та інженерія, 171 Електроніка, 172 Електронні комунікації та радіотехніка), 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка)

Рекомендовано Вченою радою Національного технічного університету України  
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, протокол № 10 від 09.12.2024 р.

#### Члени редакційної колегії

М. І. Бобир,	д-р техн. наук, проф., акад. НАН України
Є. Бондарев,	PhD, проф., Нідерланди
Х. Валеро,	PhD, проф., Іспанія
І. А. Дичка,	д-р техн. наук, проф., Україна
П. І. Лобода,	д-р техн. наук, проф., акад. НАН України
В. Прівман,	д-р, проф., США
Г. С. Тимчик,	д-р техн. наук, проф., Україна
П. Хенаф,	д-р, проф., Франція
О. Е. Чигиринець,	д-р техн. наук, проф., Україна

Секретар редакції Т. Г. Кулікова

Редактори Н. В. Мурашова, С. Я. Тимчишин

Комп'ютерна верстка С. А. Бобров

---

Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

Свідоцтво про державну реєстрацію: серія ДК № 5354 від 25.05.2017 р., просп. Берестейський, 37, Київ, 03056

Підп. до друку 31.12.2024. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Папір офс. Гарнітура UkrainianTimesET.  
Спосіб друку – електрографічний. Ум. друк. арк. 10,3. Обл.-вид. арк. 10,5. Наклад 30 пр. Зам. № 24-093.

Видавництво “Політехніка” КПІ ім. Ігоря Сікорського  
вул. Політехнічна, 14, корп. 15, Київ, 03056  
тел. (044) 204-81-78

# KPI SCIENCE NEWS

International research journal

---

№ 1–4 (137)

2024

---

Founded in September, 1997

Editor-in-chief

M. Z. Zgurovsky, Academician of NASU

Deputy editor-in-chief

M. Yu. Ilchenko, Academician of NASU

Executive editor

P. P. Maslyanko, Assoc. Prof., PhD

## In the issue:

Electronic communications

Information technologies, system  
analysis and control

Science of materials and  
mechanical engineering

Applied mathematics

Chemical technologies and  
engineering

Editorial office:

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute,  
ave. Beresteyskyi, 37,  
Kyiv, 03056, Ukraine

E-mail: [n.visti@kpi.ua](mailto:n.visti@kpi.ua)

<http://scinews.kpi.ua>

Founder – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Entered into the register of subjects in the field of media with the assignment of media identifier R30-02405 (decision of the National Council on Television and Radio Broadcasting of Ukraine No. 1794 dated 21.12.2023).

*According to the orders of MES of Ukraine from 12.28.2019 no. 1643, from 03.17.2020 no. 409, and from 04.05.2023 no. 392 the journal is included in the «B» category of the List of scientific publications of Ukraine on technical sciences (specialities – 113 Applied Mathematics, 121 Software Engineering, 122 Computer Science, 123 Computer Engineering, 124 System Analysis, 131 Applied Mechanics, 132 Materials Science, 133 Industrial Machinery Engineering, 134 Aviation and Aerospace Technologies, 141 Electrical Power Engineering and Electromechanics, 142 Power Engineering, 143 Nuclear Power Engineering, 144 Heat and Power Engineering, 161 Chemical Technologies and Engineering, 171 Electronics, 172 Electronic Communications and Radio Engineering, 174 Automation, Computer-Integrated Technologies and Robotics)*

Advised by the Academic Council of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, protocol No 10 on 09.12.2024.

#### Editorial Board

Mykola Bobyr,	Prof., Correspondent member of NASU, Ukraine
Egor Bondarau,	Prof., Netherlands
Jose Valero,	Prof., Spain
Ivan Dychka,	Prof., Ukraine
Petro Loboda,	Prof., Academician of NASU, Ukraine
Grygorii Tymchik,	Prof., Ukraine
Patrick Henaff,	Prof., France
Olena Chyhyrynets,	Prof., Ukraine

Editorial secretary T.G. Kulikova

Editors N.V. Murashova, S. Ya. Tymchyshyn

Desktop publishing S. A. Bobrov

---

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
Registration Certificate – ДК № 5354 on 25.05.2017, Ave. Beresteiskyyi, 37, Kyiv, 03056

Signed for printing on 31.12.2024. Format 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Text-weight paper. Font UkrainianTimesET.  
Print. tech. – electrographic. Convent. printed sheets 10,3. Published sheets 10,5. Edition of 30 copies. Order No 24-093.

Publishing House “Politehnika”, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute  
Politekhnichna Str., 14, building 15, Kyiv, 03056  
Tel.: (044) 204-81-78

---

## З М І С Т

### Електронні комунікації

<i>Стеценко О.О.</i> Аналіз сертифікації електронних довірчих послуг в Україні.....	7
<i>Льченко М.Ю., Капштик С.В., Наритник Т.М.</i> Метод протидії багатопроменевості в тропосферному зв'язку на основі застосування складених сигналів в базисі Уолша.....	18

### Інформаційні технології, системний аналіз та керування

<i>Нікітін В.О., Данилов В.Я.</i> Трансформер і Мамба для класифікації раку шкіри: попередні результати .....	26
<i>Тертичний Р.В., Чупрін Д.С., Бідюк П.І.</i> Інформаційна система для прогнозування нелінійних нестационарних процесів у фінансах.....	31
<i>Савастьянов В.В., Столяр М.В.</i> Системний підхід до комбінованого використання великих мовних та класичних моделей в задачах передбачення.....	40

### Матеріалознавство та машинобудування

<i>Нестерук І.Г.</i> Принципи оптимізації форми безпілотних апаратів великої дальності .....	49
--	----

### Прикладна математика

<i>Терещенко І.М., Миронець А.В.</i> Спосіб інформаційного впливу на політичні вподобання шляхом створення медійних коаліцій на основі С-ядра .....	62
---	----

### Хімічні технології та інженерія

<i>Сокольський Г.В.</i> Про можливості залучення фотокаталітичних методів до післявоєнної ремедіації територій України .....	69
<i>Керносенко Л.О., Самченко Ю.М., Пасмурицева Н.О., Соловйова О.О., Дибкова С.М., Шляховенко В.О., Ганусевич І.І., Самойленко О.А., Воротицький П.В., Волобаєв І.І.</i> Гібридні гідрогелі для діагностики та лікування онкологічних захворювань .....	81
Автори номера.....	89

---

## CONTENTS

### Electronic communications

- Stetsenko O.O.* Analysis of certification of electronic trust services in Ukraine..... 7
- Ilchenko M.Yu., Kapshtyk S.V., Narytnyk T.M.* Metod for increasing the spectral efficiency of troposcatter communication based on the use of composite signals in the Walsh basis ..... 18

### Information technologies, system analysis and control

- Nikitin V.O., Danilov V.Y.* Transformer vs. Mamba as skin cancer classifier: pre elementary results..... 26
- Tertychnyi R.V., Chuprin D.S., Bidyuk P.I.* Information system for forecasting nonlinear non-stationary processes in finance ..... 31
- Savastiyarov V.V., Stoliar M.V.* System approach to the combined use of large language models and classical models in foresight tasks ..... 40

### Science of materials and mechanical engineering

- Nesteruk I.G.* Shape optimization principles for long-range unmanned vehicles ..... 49

### Applied mathematics

- Tereshchenko I.M., Myronets A.V.* The method of informational influence on political preferences through the creation of media coalitions based on C-core ..... 62

### Chemical technologies and engineering

- Sokolsky G.V.* On possibility of involving photocatalytic methods in post-war remediation of territories of Ukraine..... 69
- Kernosenko L.O., Samchenko Y.M., Pasmurtseva N.O., Soloviova O.O., Dybkova S.M., Shlyakhovenko V.O., Hanusevych I.I., Samoilenko O.A., Vorotytskyi P.V., Volobaiev I.I.* Hybrid hydrogels for diagnostics and treatment of cancer ..... 81
- Contributors to the issue ..... 89

# ЕЛЕКТРОННІ КОМУНІКАЦІЇ

DOI: 10.20535/kpissn.2024.1-4.315076

УДК 004.056

О.О. Стеценко

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна  
Відповідальний автор: stetsenko.alexander@iill.kpi.ua

## АНАЛІЗ СЕРТИФІКАЦІЇ ЕЛЕКТРОННИХ ДОВІРЧИХ ПОСЛУГ В УКРАЇНІ

**Проблематика.** Сертифікація електронних довірчих послуг в Україні стикається з кількома проблемами. Ці виклики включають необхідність узгодження з міжнародними стандартами, забезпечення стійкості криптографічної інфраструктури проти кіберзагроз, що посилюються, і узгодження практики з положенням Європейського Союзу про eIDAS. Крім того, проблеми, пов'язані з сумісністю, правовими межами та загальною безпекою електронних довірчих послуг, створюють значні перешкоди.

**Мета дослідження.** Сприяння зміцненню національної системи кібербезпеки України шляхом вирішення проблем, пов'язаних із сертифікацією електронних довірчих послуг, з акцентом на компоненти криптографії та процес сертифікації.

**Методика реалізації.** Передбачає багатоаспектний підхід. Вивчення наявних систем оцінки відповідності, глобального досвіду та регуляторних механізмів у провідних країнах з акцентом на ЄС. Оцінювання сильних і слабких сторін поточних електронних довірчих послуг в Україні. Порівняння нормативно-правової бази та технічних механізмів, що діють для електронних довірчих послуг в ЄС та Україні. Пропонування практичних рекомендацій для систем акредитації та оцінювання відповідності в Україні для приведення у відповідність з регламентом ЄС eIDAS.

**Результати дослідження.** Дослідження дає цінну інформацію про виклики, з якими стикаються українські електронні довірчі служби, особливо щодо оцінки наявної системи сертифікації. Порівняльний аналіз виявляє прогалини та можливості для вдосконалення, зосереджуючись на узгодженні практик з положенням ЄС про eIDAS. Емпіричні дані дають детальне розуміння точок зору та проблем ключових зацікавлених сторін. Дослідження також визначає конкретні сфери для вдосконалення правових і технічних аспектів електронних довірчих послуг.

**Висновки.** Є нагальна потреба в системному вдосконаленні сертифікації електронних довірчих послуг в Україні, зокрема у криптографічних центрах сертифікації ключів. Вирішення цих викликів вимагає скоординованих зусиль для узгодження практики з міжнародними стандартами, посилення заходів кібербезпеки та сприяння взаємодії, а також підкреслює важливість постійного моніторингу, адаптації до нових загроз та співпраці з міжнародними партнерами для забезпечення ефективності й безпеки електронних довірчих послуг в Україні.

**Ключові слова:** сертифікація; електронні довірчі послуги; центри сертифікації ключів; регулювання eIDAS; кібербезпека; оцінка відповідності.

### Вступ

В епоху, коли домінують цифрові транзакції та зв'язок, надійність і безпека електронних довірчих послуг (Electronic trust services (ETS)) є найважливішими для стабільності національних систем кібербезпеки. Дослідження заглиблюється у складну сферу сертифікації ETS, з акцентом на компоненти криптографії та процес сертифікації ETS. Оскільки цифровий ландшафт розвивається, узгодження практики сертифікації з установленими міжнародними стандарта-

ми стає не лише стратегічним імперативом, але й необхідним кроком до зміцнення інфраструктури кібербезпеки країни.

Постанова Європейського Союзу про eIDAS (від англ. *electronic IDentification, Au-thentication and trust Services*, що дослівно означає «електронна ідентифікація, автентифікація та довірчі послуги») [1] слугує орієнтиром для дослідження, надаючи структуру, яка наголошує не лише на ефективності сертифікації, але й на її міжнародній гармонізації. Черпаючи натхнення у глобальному ландшафті, в описува-

**Пропозиція для цитування цієї статті:** О.О. Стеценко, “Аналіз сертифікації електронних довірчих послуг в Україні”, *Наукові вісті КПІ*, № 1–4, с. 7–17, 2024. doi: 10.20535/kpissn.2024.1-4.315076

**Offer a citation for this article:** O.O. Stetsenko, “Analysis of certification of electronic trust services in Ukraine”, *KPI Science News*, no. 1–4, pp. 7–17, 2024. doi: 10.20535/kpissn.2024.1-4.315076

ному документі проводиться аналіз сертифікації електронних довірчих послуг (ETS) на міжнародному рівні, щоб визначити найкращі практики та тенденції сертифікації та гармонізації з міжнародними стандартами.

Аналіз предмету дослідження виходить далеко за межі України і передбачає проведення дослідження як українських, так і закордонних джерел, щоб ретельно вивчити наявну систему сертифікації в Україні, визнаючи її сильні сторони та визначаючи сфери, які дозріли для вдосконалення. Висвітлюючи проблеми та пропонуючи прагматичні рішення, дослідження має на меті зробити внесок у практичні ідеї для підвищення безпеки та ефективності електронних довірчих служб.

Коли орієнтуєшся на складність сертифікації ETS, мета стає досить зрозуміла: прокласти шлях для більш безпечного, стандартизованого та міжнародного процесу сертифікації в Україні. Це дослідження є критичним дослідженням конвергенції кібербезпеки та ETS, прокладаючи курс на стійке й перспективне цифрове майбутнє.

### **Електронні довірчі послуги: поняття та значення**

Електронні довірчі послуги є важливим компонентом сучасного цифрового ландшафту, який сприяє безпечній онлайн-взаємодії та транзакціям. Розглянемо концепції та значення, пов'язані з ETS, висвітлюючи їх важливість та різні форми.

Електронні довірчі послуги, які часто називають е-довірчими послугами, охоплюють широкий спектр онлайн-сервісів і механізмів, які встановлюють і підтримують довіру та безпеку в електронних транзакціях і комунікаціях. Ці служби відіграють ключову роль у забезпеченні конфіденційності, цілісності та автентичності електронних даних і транзакцій. Деякі поширені приклади ETS включають цифрові підписи, електронні печатки, штампування часу, електронні служби зареєстрованої доставки та автентифікацію вебсайтів.

Електронні довірчі послуги складаються з таких ключових компонентів [2]:

**1. Цифрові підписи** – криптографічний метод, що забезпечує автентифікацію та перевірку цілісності вмісту електронних документів або повідомлень, використовуючи для перевірки унікальний приватний ключ і відповідний відкритий ключ.

**2. Електронні печатки** – подібні до цифрових підписів, але використовуються організаціями для підтвердження джерела та цілісності документів.

**3. Послуги встановлення часових позначок** – надають надійні позначки часу, які можна перевірити, для електронних документів або транзакцій, важливі для юридичних цілей і доказів.

**4. Автентифікація вебсайту** – забезпечує легітимність і безпеку вебсайтів, часто реалізовані через сертифікати Secure Sockets Layer (SSL).

### **Криптографічні компоненти у довірчих службах**

У сфері ETS криптографічні компоненти утворюють основу безпеки, забезпечуючи конфіденційність, цілісність і автентичність електронних даних і транзакцій.

**Шифрування** [3], фундаментальна криптографічна техніка, захищає конфіденційну інформацію від несанкціонованого доступу під час передачі чи зберігання. Воно перетворює відкритий текст на зашифрований за допомогою криптографічних алгоритмів і ключів. Ключові аспекти шифрування довірчих служб включають:

- Симетричне шифрування: використовує один секретний ключ як для шифрування, так і для дешифрування. Ефективний, але вимагає безпечного розповсюдження ключів.

- Асиметричне шифрування: також називають криптографією з відкритим ключем, воно використовує пару ключів – відкритий ключ для шифрування і закритий ключ для дешифрування. Забезпечує безпечне спілкування без необхідності безпечного обміну ключами.

**Цифрові підписи** [4], вирішальні в довірчих службах, автентифікують і перевіряють цілісність електронних документів і повідомлень. Основні аспекти включають:

- Відкритий і закритий ключі: передбачають використання пар відкритих і закритих ключів. Закритий ключ створює підпис, а відповідний відкритий ключ перевіряє його.

- Невідмова: цифрові підписи забезпечують невідмову, не дозволяючи підписантам заперечувати свою участь у підписанні документа чи повідомлення.

**Криптографічні алгоритми** є фундаментальними для роботи довірчих служб. Вони визначають спосіб шифрування, дешифрування та цифрових підписів. До відомих криптографічних алгоритмів відносять:



AES (Advanced Encryption Standard) [5]: AES, який широко використовують для симетричного шифрування, забезпечує надійний захист і високу продуктивність.

RSA (аббревіатура від прізвищ Rivest, Shamir та Adleman) [6]: популярний асиметричний алгоритм шифрування, відомий безпекою та значним поширенням.

Криптографія еліптичної кривої (ECC – від англ. Elliptic-curve cryptography) [7]: ECC забезпечує надійний захист із меншою довжиною ключа, що робить його ефективним у середовищах з обмеженими ресурсами.

**Криптографічні хеш-функції** [8] відіграють вирішальну роль у забезпеченні цілісності та автентичності даних. Ключові аспекти криптографічних хеш-функцій включають:

- Стійкість до зіткнень: хороша хеш-функція повинна зробити обчислювально неможливим пошук двох різних вхідних даних, які дають однаково хеш-значення.
- Детермінованість: однакові вхідні дані завжди повинні давати однаково хеш-значення.
- Ефективність: хеш-функції мають бути ефективними для обчислення.

У довірчих службах **центри сертифікації ключів** [9] (КСС – від англ. key certification centers) видають цифрові сертифікати, які пов'язують криптографічні ключі з об'єктами. Криптографічні підсистеми КСС включають такі елементи:

- Генерація пар ключів: КСС генерують пари ключів і керують ними, забезпечуючи безпечне зберігання та розподіл відкритих і закритих ключів.
- Видача сертифіката: КСС видають цифрові сертифікати, що містять відкритий ключ власника сертифіката, підписаний закритим ключем КСС.
- Відкликання сертифіката: КСС керують відкликанням сертифіката у разі компрометації або проблем із безпекою, щоб запобігти зловживанням.

### **Огляд та оцінювання наявної системи оцінки сертифікації електронних довірчих послуг, їх складових**

Оцінювання ETS – це критично важливий процес, призначений для оцінювання і підтвердження безпеки, надійності та відповідності цих послуг встановленим стандартам і правилам.

Сертифікаційне оцінювання є основою довіри та безпеки в епоху цифрових технологій. Його головна мета – встановити й підтримувати

довіру до електронних довірчих послуг та їх постачальників.

Сертифікацію електронних довірчих послуг зазвичай проводять уповноважені органи. Ці організації забезпечують компетентність і неупередженість через акредитацію, яка часто контролюється національними органами, і дотримання таких стандартів, як ISO/IEC 17065. Основні міркування включають незалежність від оцінюваних організацій, технічний досвід у таких сферах, як інформаційна безпека, криптографія та відповідні стандарти, регулятивний нагляд і визначені терміни дії сертифікатів, що потребує періодичної переоцінки для подальшої відповідності.

Оцінювання наявних систем сертифікації ETS є вирішальним кроком у розумінні їхніх сильних і слабких сторін, а також можливостей для вдосконалення.

Основою для ETS в Україні став Закон України «Про електронні довірчі послуги» [10], який було прийнято з метою приведення практики України у відповідність до нормативних актів Європейського Союзу, зокрема Регламенту eIDAS (Електронна ідентифікація та довірчі послуги). Ця законодавча база створила основу для регулювання та сертифікації ETS у країні.

Відповідно до статті 32 Закону України «Про електронні довірчі послуги» суб'єкти, у тому числі юридичні особи та фізичні особи-підприємці, які мають намір надавати електронні довірчі послуги, можуть добровільно пройти процедуру [11] оцінювання відповідності за власний кошт. Цей порядок, який регламентується Кабінетом Міністрів України, оцінює відповідність вимогам до кваліфікованих надавачів ETS. Акредитовані органи з оцінювання відповідності, суб'єкти, акредитовані національними органами з акредитації, проводять це оцінювання у сфері ETS. Оцінювання враховує законодавство щодо кваліфікованих електронних довірчих послуг, особливо для суб'єктів ринків фінансових послуг, що регулюються Національним банком України, та операторів/учасників платіжних систем, а також враховує законодавство про захист інформації.

### **Процедура оцінювання відповідності у сфері електронних довірчих послуг**

У сфері ETS процедура оцінювання відповідності передбачає вибір клієнтом органу з оцінювання відповідності та укладення договору. Клієнт може обрати іноземний орган, акредито-

ваний міжнародними органами, такими як Міжнародний форум з акредитації або Європейське співробітництво з акредитації.

Оцінювання, яке проводять у два етапи, включає перевірку документації та виїзд на місце для підтвердження результатів і перевірених послуг аудитом. Після кожного етапу формуються звіти, а орган з оцінювання відповідності видає документ про відповідність на основі аналізу звіту про аудит. Оцінювання проводять відповідно до ДСТУ ETSI EN 319 403-1:2021 та ДСТУ ETSI TS 119 403-2:2021 з урахуванням потреб замовника щодо усунення виявлених недоліків. Орган з оцінювання відповідності звітує про всі висновки клієнта, деталізуючи їх значний вплив на безпеку і здатність надавати кваліфіковані ETS.

Під час процедури оцінювання відповідності, якщо замовник має намір продовжити процеси щодо забезпечення відповідності своїх ETS вимогам стандартів та нормативних актів, він повинен надати органу з оцінювання відповідності план усунення виявлених недоліків. Орган проводить оцінювання коригувальних заходів, оцінює терміни виконання та інформує замовника про додаткові завдання для підтвердження.

Коригувальні дії щодо незначних невідповідностей, які мають обмежений вплив на безпеку та здатність обслуговування, мають бути вжиті протягом трьох місяців або, якщо вони складні, протягом шести місяців після повідомлення.

Після проведення оцінювання орган з оцінювання відповідності приймає рішення про повну відповідність або невідповідність вимогам ETS. Результатом рішення щодо відповідності [12] є підписаний документ, який видається замовнику, тоді як рішення про невідповідність включає аудиторський звіт із детальними висновками та виявленими недоліками.

Кваліфіковані постачальники ETS, зазначені в Довірчому списку, проходять регулярне оцінювання відповідності кожні 24 місяці. Орган з оцінювання відповідності встановлює програму для періодичного оцінювання на місці для перевірки відповідності вимогам ETS. Позапланове оцінювання враховує обставини, викладені у ДСТУ ETSI EN 319 403-1:2021 та ДСТУ ETSI TS 119 403-2:2021.

Кваліфіковані виконавці зобов'язані оперативно інформувати Держспецзв'язку про проведення як планового, так і позапланового оцінювання, надавши протягом трьох робочих днів документи відповідності та аудиторські звіти.

Органи з оцінювання відповідності роблять результати оцінювання ETS загальнодоступними.

### Довірчий список

Довірчий список, яким керує Центральний засвідчувальний центр [13], регулярно оновлюється та безпечно публікується на його офіційному вебсайті. Він містить відомості про кваліфікованих постачальників довірчих послуг та про зміст їхніх ETS. Цей список відповідає обов'язковим вимогам, встановленим Кабінетом Міністрів України (КМУ), і дотримується порядку ведення, затвердженого Міністерством цифрової трансформації.

Файл надає інформацію про кваліфікованих постачальників довірчих послуг та їхні послуги з використанням алгоритмів електронного підпису, визначених ETSI TS 119 312:2021 та ДСТУ 4145-2002. Крім того, містить деталі щодо надавачів та послуг відповідно до «Порядку введення експериментального проекту щодо взаємного визнання електронних довірчих послуг між Україною та Європейським Союзом», затвердженого постановою КМУ від 22.10.2022 № 1311. Файл довірчого списку є загальнодоступним і містить електронну печатку для автоматизованої обробки.

*Довірчі списки з переліком КНЕДП для використання ЕДП в межах України.*

Довірчі списки в Україні документують кваліфікованих постачальників довірчих послуг (КПДП) для використання довірчих послуг у межах країни, розділених на три сегменти:

1. Транскордонний довірчий список [14].
2. Списки довіри для ДП в Україні [15].
3. Списки довіри для використання ДП в Україні (ДСТУ ETSI TS 119 312:2021) [16].

### Електронний реєстр чинних, блокованих і скасованих сертифікатів відкритих ключів

На вебсайті [17] розміщено електронний реєстр (табл. 1), який містить відомості про дійсні, заблоковані та відкриті сертифікати відкритих ключів. Ця електронна база даних містить різноманітні сертифікати, наприклад сертифікати електронної печатки Центрального засвідчувального органу (ЦЗО), які використовуються в режимі реального часу. Він також містить сертифікати кваліфікованих постачальників ETS (надалі – постачальники), створені за допомогою сертифіката електронної печатки

Таблиця 1. Кваліфіковані надавачі електронних довірчих послуг

№ з/п	Юридична особа	Кваліфікований надавач електронних довірчих послуг
1	АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО КОМЕРЦІЙНИЙ БАНК «ПРИВАТБАНК»	Кваліфікований надавач електронних довірчих послуг АЦСК АТ КБ «ПРИВАТБАНК»
2	Військова частина 2428	Кваліфікований надавач електронних довірчих послуг «Військова частина 2428» Державної прикордонної служби України
3	Генеральний штаб Збройних сил України	Кваліфікований надавач електронних довірчих послуг «Центр сертифікації ключів Збройних сил України»
4	Офіс Генерального прокурора	Кваліфікований надавач електронних довірчих послуг органів прокуратури України
5	Державна казначейська служба України	Кваліфікований надавач електронних довірчих послуг Державної казначейської служби України
6	Акціонерне товариство «Оператор ринку»	Кваліфікований надавач електронних довірчих послуг «АЦСК ринку електричної енергії»
7	Державне підприємство «ДІА»	Кваліфікований надавач електронних довірчих послуг «ДІА»
8	...	...

Центрального органа сертифікації (ЦОС) із власним підписом. Реєстр вказує статус, обмеження використання та списки відкликаних сертифікатів, виданих ЦОС.

Міністерство цифрової трансформації України наказом від 28 липня 2020 року (№ 112) [18] затвердило Порядок ведення цього реєстру. Кваліфіковані провайдери, зазначені в Довірчому списку, можуть пропонувати виключно електронні довірчі послуги в банківській системі України та під час переказу коштів.

Як центральний сертифікуючий орган Міністерство забезпечує включення довірчого списку інформації про кваліфікованих поставальників та їхні послуги у форматі, придатному для автоматизованої обробки.

#### Глобальна система сертифікації електронних довірчих послуг: Європа

Європа, й особливо Європейський Союз, є піонером у розробленні комплексної та стандартизованої системи сертифікації ETS. Регламент eIDAS (Електронна ідентифікація та довірчі послуги), запроваджений у 2016 р., є наріжним каменем цієї прогресивної структури.

Регламент eIDAS є основним інструментом, що формує ландшафт сертифікації в Європі. Він встановлює узгоджену структуру для ETS, спрямовану на створення безперервного і безпечного цифрового середовища у країнах-членах ЄС. Регламент охоплює різні компоненти, важливі для сертифікації ETS, від електронних підписів

до поставальників довірчих послуг, встановлюючи узгоджений підхід для підвищення довіри до онлайн-взаємодії.

*Основними цілями eIDAS є підвищення безпеки, надійності та транскордонної сумісності електронних транзакцій у межах ЄС.* Він спрямований на створення правової основи, яка забезпечує надійність і юридичну дійсність електронних підписів і довірчих послуг, тим самим сприяючи єдиному цифровому ринку.

*Одним із фундаментальних аспектів eIDAS є надання правового визнання електронних підписів та інших довірчих послуг.* Регламент встановлює умови, за яких електронні підписи мають такий самий правовий статус, як і власноручні підписи, забезпечуючи юридичну визначеність для фізичних осіб і компаній, які беруть участь у цифрових транзакціях.

Згідно з цим регламентом держави-члени зобов'язані створювати, підтримувати і публікувати *довірені списки*. Ці списки містять інформацію про кваліфікованих поставальників довірчих послуг і послуги, які вони пропонують. Довірені списки відіграють вирішальну роль у забезпеченні визначеності серед операторів ринку та сприянні сумісності кваліфікованих довірчих послуг.

Регламент eIDAS забезпечує правову основу для транскордонної електронної ідентифікації, автентифікації та сертифікації вебсайтів у межах ЄС. Він спрямований на створення передбачуваного нормативного середовища для електронних транзакцій у ЄС.

## Довірчі списки ЄС

Держави-члени зобов'язані створювати, зберігати та публікувати довірені списки кваліфікованих надавачів довірчих послуг і послуг, які вони надають.

Відповідно до Регламенту про електронну ідентифікацію та довірчі послуги [19] для електронних транзакцій на внутрішньому ринку (Регламент eIDAS), національні довірчі списки мають установчу силу. Інакше кажучи, надавач довірчих послуг і довірчі послуги, які він надає, будуть кваліфіковані тільки в тому випадку, якщо він з'явиться у списку довірених осіб. Користувачі, включаючи громадян, підприємства та державні адміністрації, отримують юридичну силу, пов'язану з певною кваліфікованою довірчою послугою, лише якщо остання вказана як кваліфікована у списках довіри.

Стаття 22 Регламенту eIDAS зобов'язує держави-члени створювати, підтримувати і публікувати довірені списки. Ці переліки повинні включати інформацію, пов'язану з кваліфікованими надавачами довірчих послуг, за яких вони відповідають, та інформацію, пов'язану з кваліфікованими довірчими послугами, що надаються ними. Списки публікуються захищеним способом, з електронним підписом або печаткою у форматі, придатному для автоматизованої обробки.

Довірчі списки мають важливе значення для забезпечення визначеності між операторами ринку, оскільки вони вказують на статус постачальника послуг та послуги на момент нагляду. Вони спрямовані на сприяння інтероперабельності кваліфікованих довірчих послуг шляхом полегшення перевірки електронних підписів та електронних печаток тощо.

Держави-члени можуть додавати довірчі послуги, відмінні від кваліфікованих, до довірчих списків, на добровільній основі. Однак це лише на національному рівні, і слід чітко вказати, що вони не кваліфіковані відповідно до Регламенту eIDAS.

Для того, щоб надати доступ до довірених списків усіх держав-членів, Комісія через захищений канал до автентифікованого вебсервера надає громадськості довірені списки, нотифіковані державами-членами, у підписаній або скріпленій печаткою формі, придатній для автоматизованої обробки.

## Правова база та гарантії в регулюванні eIDAS

Регламент eIDAS створює міцну правову основу для ETS, забезпечуючи безпечне та юри-

дично визнане середовище. Він визначає умови дійсності та можливості виконання ETS, забезпечуючи прозорість цифрових транзакцій. Ця структура надає юридичну вагу документам із цифровим підписом, запечатаній інформації та даним із міткою часу, еквівалентним традиційним паперовим копіям, сприяючи юридичній визначеності та полегшуючи електронні транзакції.

Основні аспекти правової бази eIDAS включають:

- **Невідмовність:** Регламент гарантує, що автор електронного повідомлення чи транзакції не може заперечити участь, сприяючи підзвітності та довірі до цифрових взаємодій.

- **Відповідність міжнародним стандартам:** узгоджена з міжнародними стандартами структура eIDAS дозволяє державам-членам ЄС брати участь у безпечних цифрових транзакціях у всьому світі, сприяючи міжнародній співпраці та гармонізуючи правові стандарти.

- **Обов'язки:** визначено чіткі зобов'язання та відповідальність для постачальників довірчих послуг, кваліфікованих постачальників довірчих послуг і кінцевих користувачів, що створює прозоре та підзвітне середовище для електронних транзакцій.

- **Захист кінцевих користувачів:** Регламент містить гарантії захисту кінцевих користувачів від шахрайства, несанкціонованого доступу та інших ризиків, пов'язаних із цифровою взаємодією, встановлюючи баланс між перевагами ETS і захистом користувачів.

- **Адаптивна структура:** визнаючи динамічну природу технологій і правових ландшафтів, правова база eIDAS розроблена для постійного перегляду та адаптації. Регулярні оновлення забезпечують реагування на нові виклики, технологічний прогрес і зміни в законодавчих вимогах, зберігаючи надійність і актуальність фреймворку протягом тривалого часу.

Підсумовуючи, Глобальна система сертифікації ETS у Європі, прикладом якої є Регламент eIDAS, є комплексною і перспективною ініціативою. Звертаючи увагу на технологічні, правові та безпекові аспекти, ця система не тільки покращує національну систему кібербезпеки держав-членів ЄС, але й встановлює еталон для світових передових практик ETS. Прагнення до гармонізації, сумісності та адаптивності позиціонує ЄС як лідера у створенні безпечного та юридично визнаного середовища для електронних транзакцій. Порівняльний аналіз систем ETS України та ЄС показано у табл. 2



Таблиця 2. Порівняння системи сертифікації електронних довірчих послуг: Україна та Європейський Союз

Аспект системи сертифікації	Україна	Європейський Союз
Нормативно-правова база	Україна розробила нормативно-правову базу для ETS відповідно до міжнародних стандартів	ЄС має всеосяжну нормативно-правову базу, яка регулюється насамперед Регламентом eIDAS, що забезпечує юридичну ясність і правозастосовну силу
Оцінювання відповідності	Україна розробила свою систему оцінювання відповідності для ETS. Вона відбувається згідно із законом України «Про електронні довірчі послуги», стаття 32. «Оцінка відповідності у сфері електронних довірчих послуг»	ЄС, відповідно до Регламенту eIDAS, має добре налагоджену систему оцінювання відповідності, що забезпечує дотримання визначених стандартів
Криптографічні підсистеми	Україна розробляє та сертифікує криптографічні підсистеми для забезпечення безпеки ETS	ЄС через систему eIDAS здійснює сувору сертифікацію криптографічних підсистем, що охоплює алгоритми шифрування, управління ключами та інфраструктуру
Правове визнання	Україна визнає ETS відповідно до міжнародних стандартів. Згідно із Законом України «Про електронні документи та електронний документообіг», стаття 8	Регламент ЄС eIDAS забезпечує правове визнання, визначаючи умови, за яких ETS вважаються дійсними та примусово виконуваними
Транскордонне визнання	Україна прагне посилити транскордонне визнання своїх ETS відповідно до міжнародних стандартів	Регламент ЄС eIDAS сприяє транскордонному визнанню, дозволяючи безперешкодно здійснювати електронні транзакції між країнами-членами
Найважливіші стандарти та настанови	Україна приймає міжнародні стандарти та настанови щодо ETS як частину свого процесу сертифікації	ЄС покладається на стандарти, встановлені eIDAS, і дотримується міжнародних стандартів інтероперабельності та сумісності
Постійний моніторинг та адаптація	Кваліфіковані надавачі ETS кожні 24 місяці проходять процедуру оцінювання відповідності для доведення того, що вони та ETS, які ними надаються, відповідають вимогам	ЄС згідно з eIDAS включає положення про постійний моніторинг, забезпечуючи адаптацію системи сертифікації до нових викликів

### Проблеми і рекомендовані рішення для вдосконалення електронних довірчих служб

Електронні довірчі послуги утворюють основу безпечних цифрових транзакцій, забезпечуючи основу для надійної взаємодії у цифровій сфері. Однак, щоб підтримувати свою ефективність і надійність, ці служби повинні орієнтуватися й подолати кілька проблем. Заглиблюючись у багатогранний ландшафт ETS, досліджуючи спільні виклики, з якими стикаються як в Україні, так і в усьому світі, від загроз кібербезпеці до юридичних складнощів, перешкоди, з якими стикаються ці служби, вимагають комплексних рішень, які поєднують технологічні інновації, нормативні вдосконалення та навчання користувачів.

Проблеми, які виникають у сфері ETS, не поодинокі; вони резонують у міжнародному масштабі. Оскільки цифрові транзакції стають все більш невід'ємною частиною нашого по-

всякденного життя, потреба у безпечній і надійній системі є першорядною. Таким чином, обговорення в цьому розділі зосереджено навколо конвергенції проблем і потенційних рішень, які можна застосовувати універсально. Незалежно від того, в Україні чи за кордоном, спільність цих викликів підкреслює спільну відповідальність за зміцнення ETS у всьому світі.

Для ефективного вирішення цих універсальних проблем важливо систематизувати їх та визначити перевірені рішення, які були успішно впроваджені в різних країнах. Аналізуючи повторювані виклики та усталені підходи до їх пом'якшення, надамо короткий список проблем і найбільш поширених рішень для подолання визначених проблем:

#### 1. Загрози кібербезпеці [20].

1.1. *Проблеми.* Загрози кібербезпеці становлять серйозну проблему для електронних довірчих служб. Ці загрози можуть проявлятися в різ-

них формах, включаючи хакерство, зловмисне програмне забезпечення та інші зловмисні дії, що ставлять під загрозу цілісність і конфіденційність приватної інформації.

#### 1.2. *Рішення:*

- Постійний моніторинг: впровадження надійних систем моніторингу для виявлення кіберзагроз та реагування на них у реальному часі.
- Розширені методи шифрування: використання найсучасніших методів шифрування для захисту даних від несанкціонованого доступу.
- Співпраця: налагодження спільних зусиль з експертами та організаціями з кібербезпеки, щоб бути у курсі нових загроз.

### 2. *Проблеми сумісності.*

2.1. *Проблеми.* Несумісність між різними системами та технологіями може перешкоджати безперебійній роботі електронних довірчих служб, що призводить до неефективності та потенційної вразливості.

#### 2.2. *Рішення:*

- Стандарти сумісності: дотримання міжнародних стандартів сумісності для забезпечення сумісності різних систем.
- Інтеграція API: впровадження рішень інтерфейсу прикладного програмування (API) для полегшення зв'язку та обміну даними між системами.
- Регулярне тестування: проведення тестів на сумісність та оновлення для вирішення проблем і забезпечення безперебійної роботи.

### 3. *Правова та нормативна складність.*

3.1. *Проблеми.* Складне правове та нормативне середовище може створювати перешкоди для електронних довірчих служб, впливаючи на їх впровадження та ефективність.

#### 3.2. *Рішення:*

- Гармонізація з міжнародними стандартами: узгодження національних нормативних актів із загальноприйнятими міжнародними стандартами, такими як положення ЄС про eIDAS.
- Чіткі вказівки щодо відповідності: надання чітких і лаконічних вказівок щодо відповідності, щоб зменшити двозначність і полегшити дотримання.
- Регулярні регулятивні оновлення: забезпечення регулярного оновлення нормативно-правової бази для вирішення нових технологічних проблем і викликів безпеки.

### 4. *Ризик шахрайства та викрадення особистих даних [21].*

4.1. *Проблеми.* Ризик шахрайства та крадіжки особистих даних становить загрозу для надійності електронних транзакцій і послуг.

#### 4.2. *Рішення:*

- Багатофакторна автентифікація: реалізація багатофакторної автентифікації для додавання рівнів безпеки та перевірки особи користувача.
- Біометрична перевірка: включення біометричних методів автентифікації, таких як відбитки пальців або розпізнавання обличчя, для покращення перевірки особи.
- Системи виявлення шахрайства: використання передових систем виявлення шахрайства, які можуть ідентифікувати підозрілі дії та транзакції.

### 5. *Технологічний прогрес і старіння [22].*

5.1. *Проблеми.* Швидкі темпи технологічного прогресу можуть спричинити застарівання наявних систем, потенційно призводячи до вразливості.

#### 5.2. *Рішення:*

- Регулярні оновлення системи: забезпечення регулярного оновлення систем електронних довірчих служб для включення останніх виправлень безпеки та функцій.
- Напрями впровадження технологій: розроблення напряму впровадження нових технологій, щоб випереджати потенційні загрози.
- Інвестиції в R&D (від англ. — research and development): виділення ресурсів для досліджень і розробок, щоб передбачити майбутні технологічні виклики та вирішити їх.

### 6. *Транскордонне юридичне визнання [1].*

6.1. *Проблеми.* Відсутність транскордонного юридичного визнання може перешкоджати ефективності ETS у все більш глобалізованому цифровому середовищі.

#### 6.2. *Рішення:*

- Міжнародна співпраця: співпраця з іншими країнами для укладення угод про взаємне визнання ETS.
- Гармонізація законодавчих меж: узгодження правових меж між кордонами для полегшення бездоганного визнання та прийняття електронних транзакцій.
- Участь у міжнародних ініціативах: активна участь у міжнародних ініціативах, спрямованих на створення стандартизованої правової бази для ETS.

Вирішення цих проблем вимагає спільних зусиль між державними установами, регуляторними органами, зацікавленими сторонами галузі та широким співтовариством для створення стійкого і надійного середовища для ETS. Рекомендовані рішення підкреслюють важливість багатогранного підходу, що включає технології,

регулювання, освіти та міжнародну співпрацю. Постійні дослідження, інформаційні кампанії та прогрес у технології й регулюванні є невід'ємною частиною подолання цих проблем і забезпечення постійного зростання ETS. Впроваджуючи ці заходи, зацікавлені сторони можуть сприяти постійному вдосконаленню та стійкості ETS, зміцненню довіри між користувачами та полегшенню безпечних цифрових транзакцій.

### **Вектори вдосконалення і майбутні технології в електронних довірчих службах**

Оскільки ландшафт електронних довірчих служб розвивається, декілька векторів удосконалення та нових технологій готові підвищити ефективність, безпеку і досвід користувачів цих послуг. Ці вектори удосконалення представляють не лише негайні рішення, але й відомі загальні шляхи для розвитку безпечних цифрових послуг. Основні сфери вдосконалення та майбутні технології включають таке:

#### **1. Технологія блокчейн [23].**

Технологія блокчейн постає як трансформаційна сила у вдосконаленні ETS. Його децентралізована та незмінна природа забезпечує безпрецедентну прозорість, знижуючи ризик маніпулювання даними та несанкціонованого доступу. Використовуючи блокчейн, електронні довірчі служби можуть створювати стійкі до втручання контрольні стежки, забезпечуючи цілісність цифрових транзакцій.

**2. Штучний інтелект** (AI – від англ. Artificial Intelligence) і машинне навчання (ML – від англ. Machine Learning)[24].

Інтеграція AI та ML вводить динамічний рівень інтелекту в електронні довірчі служби. Ці технології дозволяють системам аналізувати величезні масиви даних, виявляти закономірності та вдосконалювати процеси прийняття рішень. AI та ML можуть значно покращити виявлення загроз, автентифікацію користувачів і загальну ефективність електронних довірчих служб.

#### **3. Квантово-безпечна криптографія [25].**

Оскільки поява квантових обчислень створює потенційну загрозу для криптографічних методів, впровадження квантово захищеної криптографії стає обов'язковим. Квантово стійкі алгоритми забезпечують постійну конфіден-

ційність і цілісність ETS в умовах розвитку обчислювальних можливостей.

#### **4. Біометрична автентифікація [26].**

Біометрична автентифікація додає додатковий рівень безпеки електронним довірчим службам, покладаючись на унікальні фізіологічні чи поведінкові особливості. Цей персоналізований метод ідентифікації покращує процеси перевірки користувачів і знижує ризик неавторизованого доступу.

**5. Безпека Інтернету речей** (IoT – від англ. Internet of Things) [27].

Із поширенням пристроїв IoT безпека взаємопов'язаної мережі стає першорядною для електронних довірчих служб. Посилення засобів захисту Інтернету речей від потенційних уразливостей, які можуть бути використані для порушення цілісності електронних транзакцій.

Враховуючи ці вектори вдосконалення та майбутні технології, ETS можуть не лише вирішувати поточні виклики, але й активно захищатися від нових загроз, забезпечуючи надійну та безпечну цифрову екосистему.

### **Висновки**

1. Дослідження сертифікації ETS в Україні забезпечує глибоке розуміння поточних викликів і висвітлює критичні сфери для вдосконалення.

2. Аналізуючи українські процедури оцінювання відповідності та порівнюючи їх із визнаними міжнародними стандартами, особливо з регламентом ЄС eIDAS, дослідження підкреслює необхідність гармонізації з глобальними межами.

3. Основні рекомендації включають прийняття інтегрованих рішень для вирішення проблем кібербезпеки, проблем сумісності, регуляторних складнощів і технологічних досягнень, таких як блокчейн, штучний інтелект, квантово захищена криптографія, біометрична автентифікація та безпека Інтернету речей.

4. Це дослідження пропонує напрями для узгодження українських електронних довірчих служб з міжнародними стандартами та використання нових технологій для підвищення безпеки та ефективності як на національному, так і на глобальному рівнях.

### **References**

- [1] eIDAS Regulation website, <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/eidas-regulation>.
- [2] What are Electronic Trust Services?, <https://edicomgroup.com/blog/what-are-electronic-trust-services>.

- [3] Difference Between Symmetric and Asymmetric Key Encryption, <https://www.geeksforgeeks.org/difference-between-symmetric-and-asymmetric-key-encryption/>.
- [4] Digital signature, [https://en.wikipedia.org/wiki/Digital\\_signature](https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_signature).
- [5] Advanced Encryption Standard (AES), <https://www.geeksforgeeks.org/advanced-encryption-standard-aes/>.
- [6] RSA Algorithm in Cryptography, <https://www.geeksforgeeks.org/rsa-algorithm-cryptography/>.
- [7] Elliptic-curve cryptography, [https://en.wikipedia.org/wiki/Elliptic-curve\\_cryptography](https://en.wikipedia.org/wiki/Elliptic-curve_cryptography).
- [8] Cryptographic hash function, [https://en.wikipedia.org/wiki/Cryptographic\\_hash\\_function](https://en.wikipedia.org/wiki/Cryptographic_hash_function).
- [9] Certificate authority, [https://en.wikipedia.org/wiki/Certificate\\_authority](https://en.wikipedia.org/wiki/Certificate_authority).
- [10] Zakon Ukrainy Pro elektronnu identyfikatsiiu ta elektronni dovirchi posluhy vid 01. 12. 2022, no. 2801, <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2155-19#Text>.
- [11] Postanova KM vid 13. 09. 2024, no. 1062, Pro zatverdzhennia Poriadku provedennia protsedury otsinky vidpovidnosti u sferakh elektronnoi identyfikatsii ta elektronnykh dovirchykh posluh, <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/799-2023-n#n39>.
- [12] Zakon Ukrainy Pro zatverdzhennia vymoh u sferi elektronnykh dovirchykh posluh ta Poriadku perevirky dotrymanna vymoh zakonodavstva u sferi elektronnykh dovirchykh posluh vid 07. 11. 2018, no. 992, <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/992-2018-n#n13>.
- [13] Elektronnyi reiestr diisnykh, pryzupynenykh abo vidklykanykh serytyfikativ vidkrytykh kliuchiv (czo.gov.ua), <https://czo.gov.ua/en/ca-registry-details?type=0&id=131>.
- [14] Dovirchi spysok z perelikom KNEDP dlia vykorystannia EDP transkordonno (czo.gov.ua), <https://czo.gov.ua/trustedlist/3>.
- [15] Dovirchi spysky z perelikom KNEDP dlia vykorystannia EDP v mezhakh Ukrainy (czo.gov.ua), <https://czo.gov.ua/trustedlist/2>.
- [16] Dovirchi spysky z perelikom KNEDP dlia vykorystannia EDP v mezhakh Ukrainy (czo.gov.ua), <https://czo.gov.ua/trustedlist/1>.
- [17] Elektronnyi reiestr chynnykh, blokovanykh ta skasovanykh serytyfikativ vidkrytykh kliuchiv (czo.gov.ua), [https://czo.gov.ua/ca\\_registry](https://czo.gov.ua/ca_registry).
- [18] Zakon Ukrainy Pro zatverdzhennia Poriadku vedennia reiestru chynnykh, blokovanykh ta skasovanykh serytyfikativ vidkrytykh kliuchiv vid 29. 07. 2020, no. 112, <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0798-20#Text>.
- [19] Regulation (EU) no. 910/2014 of the European Parliament and of the Council of 23 July 2014 on electronic identification and trust services for electronic transactions in the internal market and repealing Directive 1999/93/EC, [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L\\_.2014.257.01.0073.01.ENG](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2014.257.01.0073.01.ENG).
- [20] 10 Emerging Cybersecurity Threats and Hacker Tactics in 2023, <https://www.crn.com/news/security/10-emerging-cybersecurity-threats-and-hacker-tactics-in-2023?page=1>.
- [21] How to Tell the Difference Between Identity Fraud and Identity Theft?, <https://www.mcafee.com/blogs/privacy-identity-protection/whats-the-difference-between-identity-fraud-and-identity-theft/>.
- [22] Global Risks Report 2022, Chapter 3. Digital Dependencies and Cyber Vulnerabilities. 2022, <https://www.weforum.org/publications/global-risks-report-2022/in-full/chapter-3-digital-dependencies-and-cyber-vulnerabilities/>.
- [23] What is blockchain?, <https://www.ibm.com/topics/blockchain>.
- [24] Machine Learning vs. AI: Differences, Uses, and Benefits, <https://www.coursera.org/articles/machine-learning-vs-ai>.
- [25] NIST Announces First Four Quantum-Resistant Cryptographic Algorithms, <https://www.nist.gov/news-events/news/2022/07/nist-announces-first-four-quantum-resistant-cryptographic-algorithms>.
- [26] What is Biometric Authentication? A Complete Overview, <https://heimdalsecurity.com/blog/biometric-authentication/>.
- [27] Internet of Things (IOT) security, <https://www.imperva.com/learn/application-security/iot-internet-of-things-security/>.

O.O. Stetsenko

#### ANALYSIS OF CERTIFICATION OF ELECTRONIC TRUST SERVICES IN UKRAINE

**Background.** Certification of electronic trust services in Ukraine faces several problems. These challenges include the need to align with international standards, ensure cryptographic infrastructure is resilient against evolving cyber threats, and align practices with the European Union's eIDAS regulation. In addition, issues related to interoperability, legal frameworks and the overall security of electronic trust services pose significant obstacles.

**Objective.** Contributing to the strengthening of the national cybersecurity system of Ukraine by solving problems related to the certification of electronic trust services, with an emphasis on cryptographic components and the certification process.

**Methods.** It involves a multifaceted approach. Study of existing conformity assessment systems, global experience and regulatory mechanisms in leading countries with an emphasis on the EU. Assessment of strengths and weaknesses of current electronic trust services in Ukraine. Comparison of the regulatory framework and technical mechanisms operating for electronic trust services in the EU and Ukraine. Offering practical recommendations for accreditation and conformity assessment systems in Ukraine to bring them into line with the EU eIDAS regulation.

**Results.** The study provides valuable information about the challenges faced by Ukrainian electronic trust services, especially regarding the assessment of the existing certification system. The benchmarking identifies gaps and opportunities for improvement, focusing on aligning practices with the EU eIDAS regulation. Empirical data provide a detailed understanding of the perspectives and



concerns of key stakeholders. The study also identifies specific areas for improvement in the legal and technical aspects of electronic trust services.

**Conclusions.** There is an urgent need for systematic improvement of the certification of electronic trust services in Ukraine, in particular in cryptographic key certification centers. Addressing these challenges requires a coordinated effort to align practices with international standards, strengthen cybersecurity measures, and promote interoperability. And also emphasizes the importance of constant monitoring, adaptation to new threats and cooperation with international partners to ensure the efficiency and security of electronic trust services in Ukraine.

**Keywords:** certification; electronic trust services; key certification centers; eIDAS regulation; cyber security; compliance assessment.

Рекомендована Радою  
НН інституту телекомунікаційних систем  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
22 грудня 2023 року

Прийнята до публікації  
4 квітня 2024 року

DOI: 10.20535/kpissn.2024.1-4.317380

УДК 621.396.74

М.Ю. Ільченко, С.В. Капштик, Т.М. Наритник\*

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

\*Відповідальний автор: t.narytnyk@ukr.net

## МЕТОД ПРОТИДІЇ БАГАТОПРОМЕНЕВОСТІ У ТРОПОСФЕРНОМУ ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ СКЛАДЕНИХ СИГНАЛІВ У БАЗИСІ УОЛША

**Проблематика.** У сучасних телекомунікаціях для організації зв'язку на далекі відстані використовують системи тропосферного зв'язку. Ці системи дозволяють організувати зв'язок за межами прямої видимості. Важливим фактором, який потрібно враховувати у цих системах, є багатоприменість, яка зумовлена фізичним принципом, що покладений в основу функціонування тропосферних систем. Для подолання негативного впливу цього фактора застосовують рознесений прийом та широкосмугові сигнали. Утім, широкосмугові сигнали використовують надмірну смугу частот і характеризуються низьким значенням спектральної ефективності.

**Мета дослідження.** Розроблення методу подолання негативного впливу багатоприменості за рахунок застосування складених сигналів у базисі Уолша.

**Методика реалізації.** Паралельні складені сигнали забезпечують пакетне передавання одночасно групи сигналів, що побудовані на основі повної системи взаємно ортогональних функцій Уолша–Адамара. Кожний сигнал передає один біт інформації, але паралельне передавання пакета взаємно ортогональних сигналів дозволяє уникнути зниження швидкості передавання інформації у системі. Для протидії впливу багатоприменості до складеного сигналу додаються пілот-сигнали, такими пілот-сигналами обирають окремі функції Уолша–Адамара із кращими авто- та взаємно кореляційними властивостями. До переваг складених сигналів у базисі Уолша–Адамара відносять їх спектральну ефективність, що значно перевищує спектральну ефективність широкосмугових сигналів.

**Результати дослідження.** У роботі описано метод формування складеного сигналу в базисі Уолша–Адамара із пілот-сигналами й наведено функціональну схему приймального пристрою, що забезпечує додетекторне складення сигналів із чотирьох незалежних каналів рознесеного приймання. Визначено залежність спектральної ефективності складених сигналів від розмірності використаного базису Уолша–Адамара. Застосування пілот-сигналів дозволяє забезпечити синхронне складення сигналів, прийнятих із чотирьох незалежних рознесених каналів прийому.

**Висновки.** Запропоновані технічні рішення з використанням складених сигналів у базисі Уолша дають можливість створювати системи тропосферного зв'язку, що забезпечують роботу в умовах багатоприменості, спектральна ефективність яких значно перевищує цей показник для систем, які використовують сигнали типу М-последовності, що дозволяє збільшити швидкість передавання інформації на однаковій смузі частот або підвищити їх завадостійкість, використовуючи додатково завадостійке кодування за умови фіксованої швидкості передавання інформації.

**Ключові слова:** тропосферний радіозв'язок; багатоприменість; спектральна ефективність; методи рознесеного приймання; широкосмуговий сигнал; ортогональні сигнали; пілот-сигнали; базис Уолша; функції Уолша–Адамара; сигнали типу М-последовності; приймальний пристрій, швидкість передавання інформації; завадостійке кодування.

### Вступ

У системах тропосферного зв'язку важливим фактором, що впливає на показники якості, надійності зв'язку та пропускної здатності системи, є багатоприменість. Природа багатоприменості

полягає у принципі перевипромінення радіосигналу в межах спільного об'єму, утвореного передавальним і приймальним променями тропосферної радіолінії. Щоб мінімізувати вплив негативного фактора багатоприменості, у системах та обладнанні тропосферного зв'язку

**Пропозиція для цитування цієї статті:** М.Ю. Ільченко, С.В. Капштик, Т.М. Наритник, “Метод протидії багатоприменості у тропосферному зв'язку на основі застосування складених сигналів у базисі Уолша”, *Наукові вісті КПІ*, № 1–4, с. 18–25, 2024. doi: 10.20535/kpissn.2024.1-4.317380

**Offer a citation for this article:** M.Yu. Ilchenko, S.V. Kapshtyk, T.M. Narytnyk, “Method for increasing the spectral efficiency of troposcatter communication based on the use of composite signals in the Walsh basis”, *KPI Science News*, no. 1–4, pp. 18–25, 2024. doi: 10.20535/kpissn.2024.1-4.317380

ку застосовують методи рознесеного приймання та використання сигналів із спеціальними характеристиками [1–7].

В обладнанні передавальних/приймальних засобів станцій тропосферного зв'язку зазвичай використовують рознесення сигналів за частотою та у просторі. Щоб підвищити ефективність рознесеного приймання, в обох випадках використовують сигнали складної форми, зокрема сигнали, побудовані на основі М-последовностей, укорочених М-последовностей і сегментів М-последовностей [4–9]. Реалізація алгоритмів кореляційної обробки сигналів, що надходять із різних каналів приймання, дозволяють забезпечити підвищення якості приймання, компенсуючи (або враховуючи) відносну затримку приймання, що виникає в різних каналах. Попри високу ефективність використання такого методу компенсації багатопроменевості, цей підхід має певні недоліки, зокрема, до недоліку належить його низька спектральна ефективність. Цей недолік взагалі характерний для більшості систем, в яких використовують принцип розширення спектру сигналу з використанням розширювальних последовностей. Отже, підвищення ефективності тропосферного зв'язку методом формування складених сигналів у базисі Уолша в умовах відомих частотних обмежень та обмежень на потужність передавача є актуальним завданням.

#### **Метод формування і приймання складених сигналів у тропосферному каналі з багатопроменевістю**

У пошуках методів і засобів забезпечення ефективності тропосферних систем зв'язку і приймання в умовах багатопроменевості доцільно розглянути можливість використання паралельних складених сигналів, що побудовані у базисі ортогональних двійкових функцій Уолша [10–12]. Систему ортогональних функцій Уолша використовують у системах і засобах радіозв'язку. Зокрема, у стандарті стільникового зв'язку IS-95, який в Україні поширився у форматі CDMA-стільникового зв'язку, у прямому та зворотному каналах використовували сигнали, побудовані на базі функцій Уолша.

Функції Уолша є двійковими функціями, що набувають значення  $-1$  або  $+1$ . До переваг функцій Уолша можна віднести їх ортогональність. Для обчислення лінійної комбінації функцій Уолша використовують добре відомі й відпрацьовані алгоритми дискретного та швидкого

перетворення. Зважаючи на двійковий характер функцій Уолша, в алгоритмах дискретного та швидкого перетворення використовують тільки операції з цілими або дійсними числами. Загальновідомо, що виконання операції швидкого перетворення з дійсними числами не передбачає операцій комплексного множення і потребує в чотири рази менше елементарних операцій множення порівняно з алгоритмами Фур'є.

Використання двійкових функцій Уолша дозволяє забезпечити паралельне, тобто одночасне передавання пакета двійкових символів завдовжки  $N$ . Розмірність  $N$  визначає базис системи функцій Уолша й зазвичай набуває значення  $N = 2^n$ . Пакет із  $N$  інформаційних двійкових символів надходить на вхід формувача паралельного складеного сигналу. Кожний інформаційний біт здійснює двійкову модуляцію однієї із функцій Уолша–Адамара. Усі модульовані функції Уолша складаються, і таким чином формується багаторівневий складений сигнал, що передає пакет  $N$  інформаційних бітів. Складений сигнал, побудований у базисі функцій Уолша–Адамара, визначають таким чином:

$$S(t) = \sum_{i=0}^N c_i(t)w_i(t).$$

У наведеному виразі  $c_i(t)$  – двійкові символи пакета інформації, що здійснює модуляцію функцій Уолша–Адамара;  $w_i(t)$  – функції Уолша–Адамара розмірності  $N$ .

Таким чином, метод протидії багатопроменевості у тропосферному зв'язку на основі застосування складених сигналів у базисі Уолша буде складатись із такої последовності кроків.

1. *Формування пакета інформаційних символів, до якого додано символи пілот-сигналів.*

З метою подолання впливу багатопроменевості до інформаційного пакета додаються пілот-сигнали, такими сигналами обирають кілька функцій Уолша–Адамара  $w_i(t)$ . Кількість функцій Уолша–Адамара, які використовують як пілот-сигнали  $n$ , визначається розмірністю базису Уолша  $N = 2^n$  і є показником степеня 2.

2. *Формування складеного сигналу у базисі Уолша–Адамара.*

Відомо, що функції Уолша і сигнали, побудовані на їх основі, є ортогональними на інтервалі тривалості сигналу  $T$ . Утім, кожна із цих функцій поступається за своїми авто- і взаємно кореляційними властивостями М-последовностям і похідним від них. Вибираючи функції Уолша, що будуть використовуватись як

пілот-сигнали, особливу увагу приділяють їх періодичним авто- та взаємно кореляційним властивостям. Саме ці показники впливають на ефективність оцінювання відносної затримки, що виникає у каналах тропосферного зв'язку унаслідок впливу багатопрореневості.

Разом із тим у системі ортогональних функцій Уолша є кілька функцій, періодичні авто- і взаємно кореляційні характеристики яких наближаються до характеристик М-последовностей. Ці функції і сигнали, що їм відповідають, можна використовувати як пілот-сигнали для синхронізації складених сигналів, які надходять із різних каналів приймання, обладнаних у станції тропосферного зв'язку.

Процедуру формування складеного сигналу, що побудований у базисі Уолша–Адамара, можна описати з використанням операції множення матриці-стовпця, що містить символи інформаційного повідомлення, на квадратну матрицю Уолша–Адамара  $H_N$  розмірністю  $N \times N$ . На рис. 1 показано процедуру формування складеного сигналу у базисі Уолша–Адамара з пілот-сигналами.

Зображена на рис. 1 процедура формування складеного сигналу є результатом об'єднання кількох схем. Зокрема, операція множення матриці-стовпця на матрицю Адамара – це звичайна операція, яку використовують у системах кодування; формування матриці-стовпця методом об'єднання пакета інформаційних символів і пакета символів пілот-сигналу – це операція, аналогічна формуванню OFDM-сигналу в системах 4G, 5G; амплітудне обмеження сигналу – це операція, яку широко використовують у системах радіозв'язку для підвищення потужності радіосигналу, тому цю схему в такому вигляді запропоновано вперше.

На вхід пристрою формування складеного сигналу надходить пакет інформаційних символів завдовжки  $N-n$ :

$$C = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_{N-n}\},$$

де  $c_1, c_2, c_3, \dots, c_{N-n}$  – інформаційні символи передаваного пакета інформації.

Для використання як пілот-сигналів у базисі Уолша обрано  $n$  функцій Уолша–Адамара, що відповідають вимогам мінімальних бокових викидів періодичних їх авто- та взаємно кореляційних функцій. Номери обраних функцій у базисі Уолша, що впорядкований з використанням матриць Адамара, включені до пакета символів пілот-сигналів завдовжки  $n$ :

$$Z = \{z_1, z_2, \dots, z_n\}.$$

Символи  $z_j$ , що входять до складу пакета  $Z$ , не змінюються. Умовно можна вважати, що для символів  $z_j$  виконується умова

$$z_j = 1, j = \overline{1, n}.$$

Пакети інформаційних символів  $C$  і символів пілот-сигналів  $Z$  формують матрицю-стовпець розмірністю  $1 \times N$ . Слід зауважити, що символи пілот-сигналів розміщуються у структурі матриці-стовпця відповідно до номерів обраних функцій Уолша, що будуть використані як пілот-сигнали. Сформована таким чином матриця-стовпець є вихідним масивом для формування складеного сигналу (див. рис. 1). Матрицю-стовпець множать на квадратну матрицю  $H_N$  розмірністю  $N \times N$ . Матриця  $H_N$  є матрицею Адамара, що впорядковує систему функцій Уолша розмірності  $N$ .

Для формування складеного сигналу у базисі Уолша–Адамара можна використовувати



Рис. 1. Процедура формування складеного сигналу у базисі Уолша–Адамара

алгоритм оберненого швидкого перетворення, в основі побудови якого покладено алгоритм «метелика». Сформований таким чином складений сигнал являє собою матрицю-рядок завдовжки  $N$ :

$$S = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_k, \dots, s_{N-1}, s_N\}.$$

У наведеній формі кожний символ матриці-рядка  $s_i$  визначає амплітуду складеного сигналу  $S$  на  $k$ -му часовому інтервалі тривалістю  $\Delta t$ . В аналоговій формі сформований складений сигнал має вигляд

$$\begin{aligned} S(t) &= \sum_{i=1}^N s_i(t) w_i(t) = \\ &= \sum_{i=1}^{N-n} c_i(t) w_i(t) + \sum_{j=1}^n z_j w_j(t). \end{aligned}$$

Складений сигнал  $S(t)$  являє собою суму двох складових: групу сигналів, що передають інформаційні символи  $c_i(t)w_i(t)$ , та групу пілот-сигналів  $z_j w_j(t)$ . Відсутність у позначенні символа пілот-сигналу  $z_j$  параметра часу  $t$  означає, що ці символи є незмінними.

Складений сигнал  $S(t)$  являє собою випадковий процес із дискретними значеннями, який описують біноміальним розподілом з нульовим середнім або математичним сподіванням. До особливостей функцій Уолша належить рівність кількості інтервалів часу, або тактів, де функція набуває значення  $+1$ , кількості інтервалів часу, де функція набуває значення  $-1$ . Отже середнє, або математичне сподівання кожної окремої функції та їх сукупності дорівнює 0. Стандартне відхилення для випадкової величини, розподіленої за біноміальним розподілом із рівноймовірним значенням  $+1$  та  $-1$  для кожного складового процесу, визначають формулою

$$\sigma_N = 0,5\sqrt{N}.$$

Таким чином, складені сигнали характеризуються великим значенням пік-фактора, який становить

$$K_{\text{пф}} = \frac{N}{\sigma_N} = 2\sqrt{N}.$$

Для скорочення пік-фактора складеного сигналу  $S(t)$  у схемі формування складеного сигналу (див. рис. 1) застосовано обмежувач. У результаті двостороннього обмеження амплітуди сигналу на виході обмежувача маємо таку суміш трьох випадкових процесів:

$$S(t) = \sum_{i=1}^{N-n} c_i(t) w_i(t) + \sum_{j=1}^n z_j w_j(t) + \xi(t).$$

У наведеному виразі процес  $\xi(t)$  представляє завади, що описують порушення ортогональності між функціями Уолша, яке виникає у результаті амплітудного обмеження складового сигналу.

З виходу обмежувача сигнал подається до передавача тропосферної радіолінії. Передавання радіосигналів здійснюється у двочастотному режимі на частотах  $f_{c1}$  та  $f_{c2}$ .

3. *Приймання складених сигналів з чотирьох незалежних каналів.*

На приймальній стороні тропосферної радіолінії для подолання багатопроменевості використовують традиційну схему рознесеного прийому — із двома рознесеними антенами на двох частотах — у результаті досягають чотирикратного рознесення. На рис. 2 подано запропоновану авторами статті функціональну схему приймального пристрою станції тропосферного зв'язку, яка використовує складені сигнали у базисі Уолша–Адамара з пілот-сигналами.

Запропоновану схему розроблено спеціально для ілюстрації методу рознесеного приймання паралельних складених сигналів із чотирьох незалежних каналів в умовах впливу багатопроменевості.

Високочастотні радіосигнали приймають дві антени, далі вони надходять на входи двох малошумних підсилювачів (МШП). З виходу МШП сигнали надходять на входи двох змішувачів. На опорні входи змішувачів надходять сигнали частот  $f_1$  та  $f_2$  від формувача опорних частот. Щоб підвищити стабільність опорних частот, вхід формувача підключений до виходу високостабільного кварцового генератора, який є джерелом високостабільних коливань і міток синхронізації усієї станції тропосферного зв'язку. Частоти на виході формувача опорних частот розраховані таким чином, щоб на виході сформувати сигнали на проміжній частоті  $f_{\text{пч}}$ , яка є єдиною для усіх каналів обробки сигналів у приймальному пристрої:

$$f_{\text{пч}} = f_{c1} - f_1 = f_{c2} - f_2.$$

Підсилювач проміжної частоти (ППЧ) підсилює сигнал і передає його на вхід аналого-цифрового перетворювача (А/Д).

4. *Обробка у каналі приймання сигналів з використанням узгоджених фільтрів і формування оцінки відносної затримки та визначення відношення «сигнал — шум».*



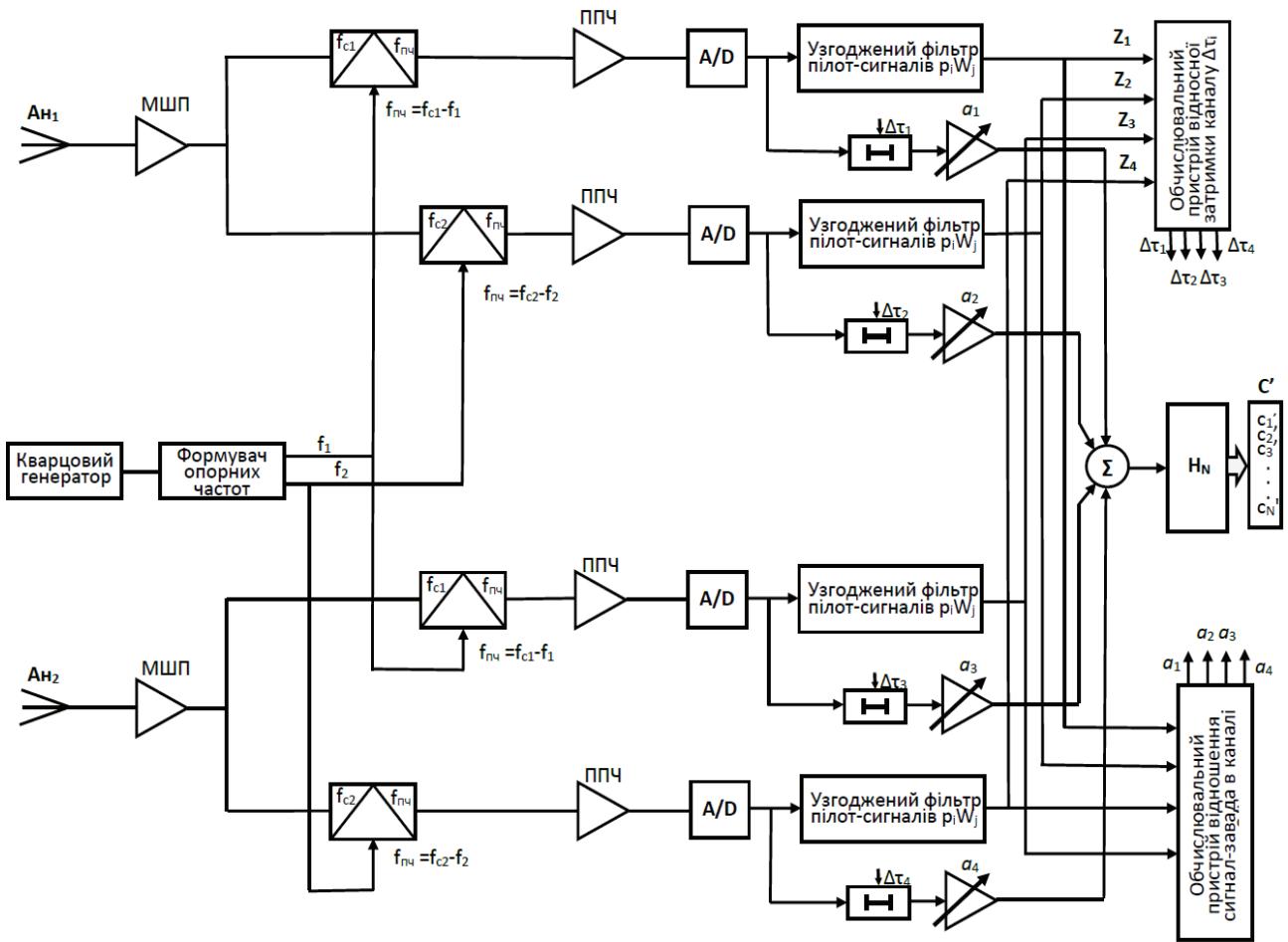


Рис. 2. Функціональна схема приймального пристрою станції тропосферного зв'язку, яка використовує складені сигнали у базисі Уолша-Адамара з пілот-сигналами

На вхід А/D надходить суміш прийнятого складеного сигналу, завади порушення ортогональності та шум:

$$S'(t) = \sum_{i=1}^{N-n} c'_i(t) w_i(t + \tau_i) + \sum_{j=1}^n z'_j w_j(t + \tau_j) + \xi'(t + \tau_l) + n(t).$$

У наведеному виразі  $c'_i$  та  $z'_j$  – прийняті інформаційні символи і символи пілот-сигналів,  $\xi'$  – прийнята реалізація завади порушення ортогональності,  $n(t)$  – тепловий шум. Усі складові суміші, що надійшли від передавача тропосферної радіолінії, за винятком теплового шуму, мають однакову затримку  $\tau_b$ , яка є спільною для обраного каналу приймання і включає затримку на багатопрореневість. Індекс  $l$  визначає номер каналу  $l$  у випадку чотириканального приймання  $l = 1, 4$ .

З виходу А/D суміш складеного сигналу, завади і теплового шуму надходить на вхід узгодженого фільтра і керованої лінії затримки. Імпульсна характеристика узгодженого фільтра  $h(t)$  налаштована на приймання одночасно  $n$  пілот-сигналів, що входять до складеного сигналу. В аналоговій формі прийом складеного сигналу в узгодженому фільтрі можна записати у такому вигляді:

$$Z_l = \int_0^T S'_l(t) h(t - \Delta t) dt = \int_0^T \left( \sum_{i=1}^{N-n} c'_i(t) w_i(t + \tau_i) + \sum_{j=1}^n z'_j w_j(t + \tau_j) + \xi'(t + \tau_l) + n(t) \right) \times h(t - \Delta t) dt.$$

Наведений вираз можна поділити на складові таким чином:

$$Z_l = \sum_{i=1}^{N-nT} \int_0^T c'_i(t) w_i(t + \tau_l) h(t - \Delta t) dt + \\ + \sum_{j=1}^n \int_0^T z'_j w_j(t + \tau_l) h(t - \Delta t) dt + \int_0^T \xi'(t + \tau_l) h(t - \Delta t) dt + \\ + \int_0^T n(t) h(t - \Delta t) dt.$$

За умови забезпечення циклової синхронізації приймання складеного сигналу перша складова у наведеному виразі визначає взаємно кореляційну функцію між функціями Уолша, що передають інформаційні символи, та функціями Уолша, що є пілот-сигналами. Зважаючи на те, що базис Уолша–Адамара побудований ортогональними функціями Уолша, ця складова набуває нульового значення на інтервали тривалості складового сигналу  $T$ . Третя і четверта складові визначають вплив завад порушення ортогональності та теплових шумів. Друга складова, яка становить інтерес, може бути подана таким чином:

$$Z'_l = \sum_{j=1}^n \int_0^T z'_j w_j(t + \tau_l) h(t - \Delta t) dt = \sum_{j=1}^n Z'_{l,j}(\tau_l).$$

Функція  $Z'_{l,j}(\tau_l)$  є відгуком на виході узгодженого фільтра в  $l$ -му каналі приймання на  $j$ -й пілот-сигнал, як пілот-сигнал використовують функцію Уолша.

Оцінки з виходів узгоджених фільтрів пілот-сигналів, які формуються в разі виявлення відгуків одразу для усіх  $n$  пілот-сигналів, передаються та вхід обчислювального пристрою відносно затримки каналу  $\Delta\tau$ . Обчислювальний пристрій має чотири входи для чотирьох каналів приймання. Обчислювальний пристрій розраховує відносну затримку надходження оцінки для кожного каналу окремо, взявши за точку відліку момент надходження першої оцінки. На підставі визначених відносних затримок  $\Delta\tau_i$  формуються керуючі сигнали для керованих ліній затримок, що входять до складу кожного каналу приймання.

Паралельно оцінки  $Z_l$  надходять на входи обчислювального пристрою відношення «сигнал – завада» (див. рис. 2). У цьому пристрої формуються оцінки показника «сигнал – завада» для кожного каналу приймання. У результаті оцінювання пристрій формує чотири сигнали  $a_i$ , які визначають вагові коефіцієнти і передаються на керуючі входи каналних підсилювачів.

5. *Оптимальне складання прийнятих сигналів з чотирьох каналів із врахуванням відносної затримки та відношення «сигнал – шум».*

У результаті отримання оцінок відносних затримок та вагових коефіцієнтів на виході суматора формується підсумковий прийнятий складовий сигнал:

$$S'(t) = \sum_{l=1}^4 a_l S'_l(t - \Delta\tau_l).$$

6. *Передавання матриці-рядка прийнятого сигналу для множення на обернену матрицю Адамара для формування пакета прийнятих інформаційних символів.*

Сформований прийнятий складовий сигнал  $S'(t)$  подається на вхід матриці Адамара, що здійснює пряме перетворення Уолша–Адамара для визначення прийнятої комбінації інформаційних символів  $C'$ :

$$C' = \{c'_1, c'_2, c'_3, \dots, c'_{N-n-1}, c'_{N-n}\}.$$

Прийнята комбінація інформаційних символів містить пакет інформації, що передана одним складеним сигналом у тропосферній системі зв'язку.

### Оцінювання спектральної ефективності

Важливим показником ефективності систем тропосферного зв'язку є спектральна ефективність, яку визначають як відношення кількості інформаційних символів (бітів) до одиниці ширини спектру частот 1 Гц. Для систем тропосферного зв'язку, в яких для протидії багатопроменевості використовують сигнали типу М-последовності або її сегменти, спектральну ефективність оцінюють виразом

$$\eta_M = \frac{R_{\text{бит}}}{\Delta F_M} = \frac{R_{\text{бит}}}{m \Delta F_{\text{бит}}} = \frac{1}{m} [\text{біт/Гц}].$$

У наведеному виразі  $R_{\text{бит}}$  – швидкість передавання інформації [біт/с];  $\Delta F_M$  – ширина смуги частот, потрібна для передавання сигналів типу М-последовності [Гц];  $m$  – довжина М-последовності;  $\Delta F_{\text{бит}}$  – смуга частот, потрібна для передавання потоку інформації зі швидкістю  $R_{\text{бит}}$  без використання розширювальної М-последовності.

У разі використання складених сигналів кожний біт передається протягом усієї тривалості складеного сигналу  $T = N \Delta t$ , де  $T$  – розмірність ортогонального базису Уолша–Адамара,  $N = 2^n$ ;  $\Delta t$  – тривалість одного символу функції Уолша,  $\Delta t = 1 / R_{\text{бит}}$ . Смуга частот, потрібна для

передавання складеного сигналу зі швидкістю передавання інформації  $R_{\text{біт}}$ , становить

$$\Delta F_{\text{cc}} = \frac{1}{\Delta t} = R_{\text{біт}} [\text{Гц}].$$

Відповідно, спектральна ефективність складених сигналів

$$\eta_{\text{cc}} = \frac{R_{\text{біт}}}{\Delta F_{\text{біт}}} = 1 [\text{біт} / \text{Гц}].$$

Цей показник становить  $\sim 1$  біт/Гц і значно перевищує показники для систем, що використовують сигнали типу М-послідовності. Для М-послідовності завдовжки  $n = 128$  спектральна ефективність становить  $\eta_{M=128} = 1 / 128 = 0,00781$  біт/Гц, а для  $n = 512$  цей показник становить  $\eta_{M=512} = 1 / 512 = 0,00195$  біт/Гц.

Утім, системи із М-послідовностями забезпечують кращі показники за показником «сигнал – завада». Отриманий виграв у спектральній ефективності дозволяє збільшити швидкість передавання інформації за однакової смуги частот або додатково використовувати завадостійке кодування за фіксованої швидкості передавання інформації.

## Висновки

1. Запропонований авторами метод формування складеного сигналу, що побудований у ба-

зисі Уолша–Адамара із пілот-сигналами з використанням операції множення матриці-стовпця, яка містить символи інформаційного повідомлення, на квадратну матрицю Уолша–Адамара розмірністю  $N \times N$  може бути взятий за основу для мінімізації впливу негативного фактора багатопроменевості під час створення сучасних тропосферних ліній і мереж зв'язку нового покоління.

2. Розроблена й описана функціональна схема приймального пристрою станції тропосферного зв'язку з використанням традиційної схеми рознесеного приймання – із двома рознесеними антенами на двох частотах, що використовує складені сигнали у базисі Уолша–Адамара із пілот-сигналами, – забезпечує за чотирикратного рознесення частот подолання багатопроменевості.

3. Запропоновані технічні рішення з використанням методу формування складених сигналів у базисі Уолша дають можливість у перспективі створити системи тропосферного зв'язку, спектральна ефективність яких значно перевищує цей показник для систем, які використовують сигнали типу М-послідовності, що дозволяє збільшити швидкість передавання інформації за однакової смуги частот або підвищити їх завадостійкість, використовуючи додатково завадостійке кодування за фіксованої швидкості передавання інформації.

## References

- [1] Sposib troposfernogo zviyazku / Patent of Ukraine for a utility model No. 108632, publication date 07/15/2016, Bull. No. 14 with priority from 01/29/2016 / Ichenko M.Yu., Narytnyk T.M., Slyusar V.I.
- [2] Recommendation ITU-R P.617-3 (09/2013). Propagation prediction techniques and data required for the design of trans-horizon radio-relay systems. P Series. Radiowave propagation/© ITU 2013.
- [3] Wave Propagation Models in the Troposphere for Long-Range UHF/SHF Radio Connections. / Available at: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1473256/FULLTEXT02.pdf>
- [4] Ichenko M.Yu., Narytnyk T.M., Slyusar V.I. / Napryamky stvorenniya troposfernykh stanciy novogo pokolinnya//Cyfrovi tekhnologiyi.-2014.- Nom. 16, P.p. 8–18
- [5] Narytnyk T.M., Vetoshko I.P., Semerij S.I., Saiko V.G., Sarapulov S.V. / Analitichniy oglyad suchasnykh tekhnologii troposfernogo ta radioreleynogo zviyazku // Visnyk universytetu «Ukrayina». Seriya - Informatyka, obchyslyvalna tekhnika, kibernetyka, 2019. - # 2 (23). – P.p. 105–120.
- [6] Slyusar V.I., Masesov M.O. / Ideologiya pobudovy perspektyvnykh troposfernykh (radioreleynykh) stanciy specialnogo pryznachennya.// Zbirnyk naukovykh prac' VITI NTUU “KPI”. – 2010. – N. 2. – P.p. 114–120.
- [7] Narytnyk T.M. / Analiz elektromagnitnoyi bezpeky suchasnykh troposfernykh radioreleynykh stanciy / Materialy 2-oyi Mizhnarodnoyi nauково-tekhnichnoyi konferenciyi «Problemy elektro-magnitnoyi sumisnosti perspektyvnykh bezdrotovykh merezh zviyazku EMS 2016» -s.61-63 m. Xarkiv
- [8] Cyfrovi radiorelejny ta troposferni liniyi zviyazku (osnovy rozrakhunku) / Narytnyk T. M., Pochernyayev V. M., Povxlib V. S./ Odes. nacz. akad. zviyazku im. O. S. Popova. - Odesa : ONAZ im. O. S. Popova, 2019. - 163 s. - ISBN 978-617-582-066-7
- [9] T.N. Narytnyk, V.V. Volkov, Yu.V. Utkin / Radiorelejny i troposferni systemy peredachi / Navch. pos. – 2008. – 349 s.
- [10] Numerical Methods. Using MATLAB. Book · Fourth Edition · 2019 8.4 The Walsh Transforms <https://www.sciencedirect.com/book/9780128122563/numerical-methods>



- [11] Vykorystannya funkczij Uolsha dlya pidvyshhennya energetychnoyi prykhovanosti cyfrovoyi radioliniyi / Andreyev O. V., Dubyna O. F., Nikitchuk T. M., Cyporenko V. V. // Visnyk NTUU «KPI». Radiotekhnika, radioaparotobuduvannya : zbirny`k naukovy`x pracz`. – 2021. – N. 85. – P.p. 27–32. doi: 10.20535/RADAP.2021.85.27-32
- [12] Koduvannya sygnaliv v elektronnykh systemax. Chastyna 3. Sposoby koduvannya sygnaliv: Tom 1. Naturalni, efektyvni ta linijni kody [Elektronnyj resurs] : navch. posib. dlya stud. specialnosti 171 «Elektronika», osvitnoyi programy «Elektronni prylady ta prystroji» / S.V. Denbnoveczkyj, I.V. Melnyk, L.D. Pysarenko / KPI im. Igorya Sikorskogo. – Elektronni tekstovi dani (1 fajl: 6,32 Mbajt). – Kyviv : KPI im. Igorya Sikorskogo, 2021.

M.Yu. Ilchenko, S.V. Kapshtyk, T.M. Narytnyk

#### METHOD FOR INCREASING THE SPECTRAL EFFICIENCY OF TROPOSCATTER COMMUNICATION BASED ON THE USE OF COMPOSITE SIGNALS IN THE WALSH BASIS

**Background.** In modern telecommunications, troposcatter communication systems organize long-distance communication. These systems allow communication beyond the line of sight. An important factor that must be considered in these systems is multipath, due to the physical principle underlying the functioning of troposcatter systems. Diversity reception and broadband signals are used to overcome this factor's negative impact. However, broadband signals use an excessive frequency band and are characterized by a low spectral efficiency.

**Objective.** The Purpose of the paper is to develop a method for overcoming the negative impact of multipath by using composite signals on the Walsh basis.

**Methods.** Parallel composite signals provide simultaneous packet transmission of a group of signals built based on a complete system of mutually orthogonal Walsh-Hadamard functions. Each signal transmits one bit of information, but the parallel transmission of a packet of mutually orthogonal signals avoids decreasing the system's information transmission rate. To counteract the effect of multipath, pilot signals are added to the composite signal, as individual Walsh-Hadamard functions with better auto- and cross-correlation properties are selected. The advantages of composite signals in the Walsh-Hadamard basis include their spectral efficiency, which significantly exceeds the spectral efficiency of broadband signals. The paper describes a method for forming a composite signal on a Walsh-Hadamard basis with pilot signals and a functional diagram of a receiving device that provides optimal pre-detector addition of signals from four independent diversity reception channels.

**Results.** The method of forming the composite signal with pilot signals based on the Walsh-Hadamard basis is presented as a functional diagram of a reception device that will ensure optimal detection of composite signals from several independent channels of a separated receiver. The spectral efficiency of the composite signals is shown on the size of the Walsh-Hadamard vicor basis. The introduction of the pilot signals makes it possible to ensure the synchronous composition of signals received from several independent receiving channels.

**Conclusions.** The proposed technical solutions using composite signals in the Walsh-Hadamard basis make it possible to create troposcatter communication systems that provide operation in multi-path conditions, and the spectral efficiency of which significantly exceeds this indicator for systems using M-sequence signals, which allows increasing in the information transmission rate at the same frequency bandwidth or increasing their noise immunity by using additional noise-resistant coding at a fixed information transmission rate.

**Keywords:** troposcatter communication; multipath propagation; spectral efficiency; diversity technique; broadband signal; orthogonal signals; pilot signals; Walsh basis; Walsh-Hadamard functions; M-sequence type signals; receiving device; information transmission rate; noise-eliminating coding.

Рекомендована Радою  
НН інституту телекомунікаційних систем  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
7 жовтня 2024 року

Прийнята до публікації  
6 грудня 2024 року

DOI: 10.20535/kpissn.2024.1-4.301028

UDC 004.855.5

V.O. Nikitin\*, V.Y. Danilov  
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine  
\*Corresponding author: nvo63911@gmail.com

## TRANSFORMER VS. MAMBA AS SKIN CANCER CLASSIFIER: PRELIMINARY RESULTS

**Background:** Skin cancer is a deadly disease that claims tens of thousands of lives annually. Early diagnosis is crucial for successful treatment. Reliable diagnostic tools typically involve surgical methods, such as histological examination. However, issues arise when such methods are not feasible or desirable: for instance, the location of the lesion on the face, allergies to anesthesia, etc. This has led to active research in non-invasive methods, including those based on neural networks. This brings about the task of skin cancer image classification. Currently, and in our specific case, the models showing the best results in classification are Transformers. Nevertheless, these models have significant computational limitations due to quadratic scaling. In this study, a new machine learning architecture was explored proposed as an alternative to Transformers. Mamba is scaled linearly and demonstrates Transformer-like efficiency in various machine learning tasks.

**Objective:** The performance of two machine learning architectures was compared, Vision Transformer (ViT) and Mamba, for skin cancer classification using dermoscopic images. The goal is to investigate the classification results of both models.

**Methods:** A well-known benchmark in skin cancer classification, the HAM10000 dataset was used, which includes 10,015 dermoscopic images. The data to address issues such as class imbalance and normalized the images was prepared. Both models, ViT and Mamba, were pre-trained on the ImageNet dataset and fine-tuned for skin cancer classification. The models based on overall accuracy and F1-score for specific skin cancer classes were evaluated.

**Results:** The dataset for classification was processed. Using pre-trained weights of the two architectural variants, VMamba and ViT, they were fine-tuned on the proposed dataset. For quality assessment, accuracy and F1-score metrics were used. The results show that the ViT and Mamba models have similar overall accuracy, with Mamba models slightly better at classifying underrepresented classes such as Bowen's disease and dermatofibroma. Both models demonstrated high F1-scores in the case of melanoma, indicating their effectiveness in detecting this severe form of skin cancer.

**Conclusions:** The results indicate that Mamba is a viable alternative to ViT for skin cancer classification due to its similar accuracy. The application of VMamba could potentially make skin cancer diagnosis cheaper and more accessible due to its efficient scaling. Further research is needed to explore other variants of the Mamba model and to enhance its performance on larger datasets.

**Keywords:** machine learning; computer vision; skin cancer; transformers; spatial state models; VMamba.

### Introduction

Skin cancer poses a significant challenge to healthcare systems worldwide. Over 1.4 million skin cancer cases were reported in 2020, of which 120,000 were fatal [1]. The key to successfully treating this disease lies in early detection – in most cases, a lesion can be removed with little to no consequences if caught in the early stages [2]. The gold standard in diagnostics is histology, which involves the surgical removal of the lesion. The problem is, there are cases when patients do not want the lesion

removed for various reasons, ranging from aesthetic (removal leaves scars) to religious concerns. Recent advancements in image analysis have focused on using dermoscopic pictures for classification, which are easy and harmless to obtain. The integration of machine learning with these images has led to the development of effective diagnostic models. In particular, the Transformer architecture, originally designed for natural language processing, has shown promise in computer vision tasks, including skin cancer analysis in recent years. The Vision Transformer [3] has demonstrated significant performance

**Пропозиція для цитування цієї статті:** В.О. Нікітін, В.Я. Данилов, “Трансформер і Мамба для класифікації раку шкіри: попередні результати”, *Наукові вісті КПІ*, № 1–4, с. 26–30, 2024. doi: 10.20535/kpissn.2024.1-4.301028

**Offer a citation for this article:** V.O. Nikitin, V.Y. Danilov, “Transformer vs. Mamba as skin cancer classifier: pre elementary results”, *KPI Science News*, no. 1–4, pp. 26–30, 2024. doi: 10.20535/kpissn.2024.1-4.301028

in both benchmarks and real-world tasks [4, 5, 6], showing higher metric values than previously used Convolutional Neural Networks (CNNs). However, despite its advantages, the model has computational challenges, making it less accessible for processing high-quality images.

Recently, a new spatial state architecture known as Mamba [7] has been introduced. It is believed that Mamba could potentially address these issues. In this paper, a basic comparison of the effectiveness of ViT and a modified Mamba model for computer vision in diagnosing skin cancer is provided. This comparison aims to determine whether Mamba could be an efficient skin cancer classifier while requiring fewer computational resources.

### Problem statement

The goal of this paper is to evaluate the effectiveness of the Mamba model for skin cancer diagnosis, using the ViT as a recognized and effective model for comparison. By comparing the results of these two models, we aim to determine whether the Mamba approach offers a solution of comparable effectiveness for the early detection of skin cancer through image analysis. Ultimately, this research seeks to contribute to the development of advanced diagnostic systems that can improve patient outcomes by facilitating timely and less invasive interventions.

### Motivation

The ViT, introduced by Alex Dosovitskiy et al. in 2021, represents a significant advancement in adapting the Transformer architecture, originally designed for Natural Language Processing (NLP), to the realm of computer vision. At the core of the Transformer is the attention mechanism [8], which selectively focuses on the most salient parts of input data, enabling the model to capture critical features with high precision.

However, the attention mechanism also introduces a challenge: the computational complexity increases quadratically with the size of the input, as the attention scores must be calculated between all pairs of input vectors. This complexity becomes a bottleneck when dealing with high-resolution images, leading to increased resource requirements and reduced accessibility. Despite numerous attempts to optimize the algorithm, maintaining the balance between efficiency and performance remains a challenge. According to recent studies, such as the one by Tay et al. (2022) [9], achieving significant re-

ductions in computational complexity often results in a trade-off with the model's performance, which is a key factor in the popularity of the Transformer architecture.

Natively, ongoing research seeks models that can solve the Transformer's computational problems while retaining high performance. One of the competitive architectures is State Space Models (SSMs). These models can generally be described by the next system of equations, where  $x(t) \in \mathbb{R}^n$  – variables,  $u(t) \in \mathbb{R}^m$  – inputs,  $y(t) \in \mathbb{R}^p$  – outputs,  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$  – state matrix,  $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$  – control matrix,  $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$  – output matrix:

$$\begin{cases} x'(t) = Ax(t) + Bu(t); \\ y(t) = Cx(t). \end{cases}$$

After a data discretization [10] step SSMs can achieve considerable performance in machine learning tasks. We find the latest advancements in this field, published in Mamba paper [7] very promising. While output items are still dependant on each other in a similar way to Recurrent Neural Networks (RNNs), on training step these dependencies (matrix A) can be precomputed allowing Mamba to train parallelly. Same time, with adding new block (token), the complexity of additional computation is not dependant on a size of a context that that was already processed (so not the way it works in Transformers). Summarising, authors were able to achieve Transformer's performance with model that scales linearly.

If the same approach works for the task of skin cancer classification that could potentially decrease the resources that are needed and therefore make final diagnostics cost more affordable. In this work we would like to do initial empirical validation of this assumption.

In order to apply Mamba to Computer Vision task we utilize its modification – VMamba [11]. In order to fit the data to the task it uses mechanism called 2D selective scan. The approach involves unfolding image patches into sequences along rows and columns and then scanning these sequences in four different directions: from top-left to bottom-right, from bottom-right to top-left, from top-right to bottom-left, and from bottom-left to top-right. Authors state that this process ensures that each pixel gathers information from all other pixels in various directions. It is important to note that the architecture used in this study, VMamba, is not the only Mamba variant for computer vision tasks. Currently, there is at least one other model known as Vision Mamba [12]. However, for this study VMamba was spe-

cifically chosen over Vision Mamba for a couple of reasons. Firstly, it demonstrated slightly better performance in classification tasks reported to the model’s authors [11, 12]. Secondly, the additional feature of bidirectional layers in Vision Mamba was not proven to be effective, making this model seem unnecessary for now. Of course, this could change in future versions of the model, and we will be eagerly anticipating new improvements proposed by the community.

## Methods

The HAM10000 [13] dataset is a well-established benchmark in the field of skin cancer classification, consisting of 10,015 dermoscopic images that include both malignant and benign lesions, with each image being cleaned and centered. It was decided to utilise this renowned dataset in order for our results to be easily reproducible for further research. In our study, a data preprocessing pipeline was implemented that integrated methods from previous research [6, 7] along with some novel techniques. The primary steps in our data preparation included:

- **Deduplication:** Duplicate images were eliminated from the dataset to ensure that each sample was unique. Each record of the dataset is marked with lesion id field by which duplicates can be identified.
- **Normalization:** The pixel intensities of the images were normalized to standardize the input data, facilitating better convergence of the models. As a result, all pixels were transformed to 0–1 range.
- **Oversampling:** To mitigate the issue of class imbalance, we applied augmentation techniques such as rotations, flips, and zooms to artificially enhance the presence of underrepresented classes. We aimed to have at least 7,000 samples of each class, addressing the class balancing problem with that strategy.
- **Test-Validation Split:** Since the HAM10000 dataset provides separate training and test data, further the train data was divided into training and validation sets using a consistent random seed to ensure reproducibility and enable a fair evaluation of model performance. The training was stopped when the model showed no improvements in the validation loss metric for 3 consecutive epochs.

To maintain the integrity of our results, we ensured uniformity in the use of augmented images and the train-test-validation split across all experiments. Each model underwent training for up to 20 ep-

ochs, with early stopping implemented to terminate training if there was no improvement in the model’s performance beyond a threshold of  $10^{-2}$  over three consecutive epochs. This strategy was employed to prevent overfitting and reduce the usage of the use of computational resources. Additionally, different learning rates were explored to enhance model convergence and prevent overlooking the optimal solution. On average, each model was trained for approximately 15 epochs, all with learning rates from  $10^{-6}$  to  $10^{-8}$ .

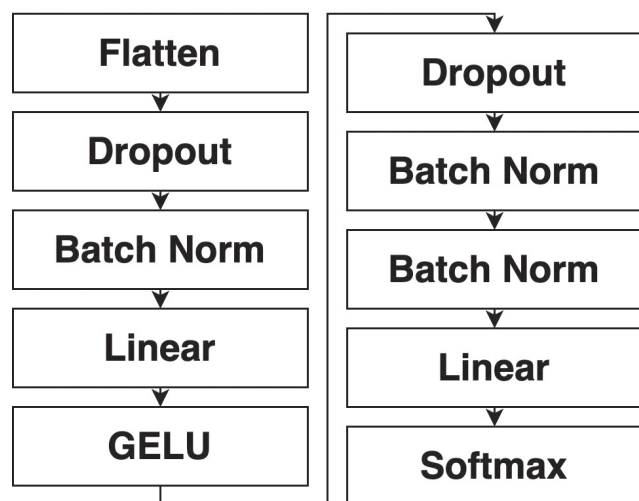


Fig. 1. Classification block used for the task

Both models were pretrained on the ImageNet dataset by other research teams [5, 6] for ImageNet classification and fine-tuned by us for the specific task at hand. Our custom classifier comprised a sequence of layers – Flatten, Dropout, Norm, Linear, GELU, Dropout, Norm, Linear, Softmax – which can be seen in Fig. 1. Three distinct learning rates were tested for each model and here presented only the ones with top learning rates. The classification block is also a result of experiments. The key metrics we focused on were overall accuracy and F1 scores for three classes: Actinic Keratosis, Intraepithelial Carcinoma, and Dermatofibroma (as the most underrepresented classes), as well as Melanoma (as the most severe and dangerous type of the disease).

## Results

Analyzing the data presented in Table 1, it is apparent that both the larger ViT models and VMamba models exhibit comparable performance in terms of overall accuracy. The ViT\_L\_32 model, utilizing the imagenet1\_kv1 weights, shows a training

**Table 1.** Fine Tuning Results

Model	Weights	Train Acc	Top-1 Acc	F1 AKEIC	F1 Df	F1 Mel
vit_l_32	imagenet1_v1	0.98	0.76	0.49	0.64	0.88
vit_l_16	imagenet1k_swag_linear_v1	0.85	0.8	0.44	0.75	0.9
VMamba-T	vssmtiny_dp02_ckpt_epoch_258	0.95	0.8	0.6	0.76	0.9
VMamba-B	vssm_base_0229_ckpt_epoch_237	0.91	0.77	0.65	0.65	0.87

accuracy of 0.98 and a commendable top-1 accuracy of 0.76. This suggests the lowest generalizability of the model to new data if compared to every other model trained in this research. As for F1 scores for the targeted classes, VMamba models show a slightly superior performance, particularly in classifying Actinic Keratoses and Intraepithelial carcinoma / Bowen's Disease (AKEIC), with the VMamba-T and VMamba-B achieving an F1 score of 0.6 and 0.65 for AKEIC, which is notable considering the underrepresented nature of this class.

For Dermatofibroma (Df), a rare category, both models perform well, but the ViT\_L\_16 model, with the imagenet1k\_swag\_linear\_v1 weights, lags slightly behind with an F1 score of 0.75 compared to the VMamba-T's 0.76. This indicates VMamba's potential in handling classes with fewer training samples more effectively. In the crucial case of Melanoma (Mel), which is of the highest concern due to its severity, both models deliver high F1 scores, with VMamba-B and ViT\_L\_16 both achieving score 0.9, demonstrating their robustness in identifying this dangerous form of skin cancer.

Summarizing, while both ViT and VMamba architectures demonstrate high efficacy in skin cancer classification tasks, VMamba models, in particular, show promise in their handling of specific, less represented classes without compromising on the detection of more severe conditions such as Melanoma. These findings underscore the potential of using these models in clinical settings, where they should be less expensive while being as effective as ViT based ones.

## Conclusions

There is a problem in non invasive skin cancer classification where top performance modules happen to be computationally expensive. Because of quadratic scaling, implementing ViT in diagnostics could cause a drastic increase in costs, as higher image resolutions lead to higher diagnostic prices. To make early diagnostics an option, it must be financially affordable and therefore ViT is not a perfect fit for the task. In this research, we aimed to provide initial evidence of the effectiveness of a novel Transformer competitor, Mamba, in the area of skin cancer classification.

Our research lays a solid base for further exploration of VMamba for medical diagnostics, and oncology in particular. Our results suggest that VMamba can be just as effective for the task as Transformer is, which in combination of cheaper computation makes VMamba a good fit for medical diagnostics. We hope further researchers will explore the Mamba model more extensively. We assume the next vector should be: reconsidering classification head and different learning strategies, exploring other Mamba's Computer Vision modifications and fine tuning model on higher volumes of data. More advanced researched may also consider results of VMamba's cross scan module in order to better fit this mechanism to dermoscopy images which should, theoretically lead to better model's performance. Hardware aspect of task has some space for exploration as well. The exact resource ratios of the models were not assessed, as such a comparison is complex and beyond the scope of this paper, especially since Mamba is already established as more resource-efficient than Transformer-based models.

## References

- [1] World Cancer Research Fund International, "Skin cancer statistics", 2022. Available: <https://www.wcrf.org/cancer-trends/skin-cancer-statistics/>. [Accessed: 28-Mar-2024].
- [2] A.F. Jerant, J.T. Johnson, C.D. Sheridan, and T.J. Caffrey, "Early detection and treatment of skin cancer", *Am. Fam. Physician*, vol. 62, no. 2, pp. 357–368, Jul. 2000. Available: <https://www.aafp.org/pubs/afp/issues/2000/0715/p357.html>. [Accessed: 28-Mar-2024].
- [3] A. Dosovitskiy et al., "An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale", arXiv preprint arXiv:2010.11929v2, 2020. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.11929>. [Accessed: 28-Mar-2024].



- [4] V. Nikitin, and N. Shapoval, “Vision Transformer for Skin Cancer Classification”, *Scientific Collection “InterConf+”*, no. 33 (155), May 2023, pp. 449–60. Available: <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.05.2023.039>. [Accessed: 28-Mar-2024].
- [5] G. Yang, S. Luo, and P.A. Greer, “A Novel Vision Transformer Model for Skin Cancer Classification”, *Neural Process. Lett.*, vol. 55, pp. 9335-9351, 2023. Available: <https://doi.org/10.1007/s11063-023-11204-5>. [Accessed: 28-Mar-2024].
- [6] C. Xin et al., “An improved transformer network for skin cancer classification”, *Comput. Biol. Med.*, vol. 149, p. 105939, 2022. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2022.105939>. [Accessed: 28-Mar-2024].
- [7] A. Gu, and T. Dao, “Mamba: Linear-time sequence modeling with selective state spaces”, arXiv preprint arXiv:2312.00752, 2023. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.00752>. [Accessed: 28-Mar-2024].
- [8] A. Vaswani et al., “Attention is all you need” arXiv preprint arXiv:1706.03762, 2017. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762>. [Accessed: 28-Mar-2024].
- [9] F.D. Keles, P.M. Wijewardena, and C. Hegde, “On the computational complexity of self-attention” arXiv.org, 2022. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.04881>. [Accessed: 28-Mar-2024].
- [10] A. Gu, K. Goel, and C. Rй, “Efficiently modeling long sequences with structured state spaces”, arXiv.org, 2022. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.00396>. [Accessed: 28-Mar-2024].
- [11] Y. Liu et al., “Vmamba: Visual state space model”, arXiv preprint arXiv:2401.10166, 2024. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.10166>. [Accessed: 28-Mar-2024].
- [12] L. Zhu et al., “Vision mamba: Efficient visual representation learning with bidirectional state space model”, arXiv preprint arXiv:2401.09417, 2024. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.09417>. [Accessed: 28-Mar-2024].
- [13] P. Tschandl, C. Rosendahl, and H. Kittler, “The HAM10000 dataset, a large collection of multi-source dermatoscopic images of common pigmented skin lesions”, *Sci. Data*, vol. 5, 180161, 2018. Available: <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.161>. [Accessed: 28-Mar-2024].

В.О. Нікітін, В.Я. Данилов

#### ТРАНСФОРМЕР І МАМБА ДЛЯ КЛАСИФІКАЦІЇ РАКУ ШКІРИ: ПОПЕРЕДНІ РЕЗУЛЬТАТИ

**Проблематика.** Рак шкіри – це смертельне захворювання, яке щороку забирає життя десятків тисяч людей. Ключовим елементом успішного лікування є рання діагностика. Типовим інструментом надійної діагностики є методи, що потребують хірургічного втручання, як, наприклад, гістологічне дослідження. Проблема постає, коли застосування таких методів не є можливим чи бажаним: розміщення утворення на обличчі, алергія на анестезію тощо. Через це активно ведеться дослідження неінвазивних методів, зокрема на основі нейронних мереж. Так постає завдання класифікації зображень раку шкіри. Моделі, які показують найкращі результати у класифікації наразі – трансформери. Тим не менше цей тип моделей має значні обчислювальні обмеження – квадратичне масштабування. У цій роботі ми досліджуємо нову архітектуру машинного навчання, що була запропонована як альтернативна трансформерам. Мамба масштабується лінійно і демонструє схожу до трансформерів ефективність у низці задач машинного навчання.

**Мета дослідження.** Ми порівняли ефективність двох архітектур машинного навчання – Vision Transformer (ViT) та Mamba – для класифікації раку шкіри за допомогою дермоскопічних зображень. Метою є дослідження результатів класифікації двома моделями.

**Методика реалізації.** Ми використали набір даних HAM10000, відомий бенчмарк у класифікації раку шкіри, що включає 10 015 дермоскопічних зображень. Ми підготували дані для вирішення проблем, таких як дисбаланс класів, і нормалізували зображення. Обидві моделі, ViT та Mamba, були попередньо навчені на наборі даних ImageNet та допрацьовані для класифікації раку шкіри. Ми оцінили моделі на основі загальної точності та F1-score для конкретних класів раку шкіри.

**Результати дослідження.** Ми обробили набір даних для класифікації. Взнявши заздалегідь натреновані ваги двох варіантів архітектур VMamba та ViT, ми донавчили їх на запропонованому наборі. Для оцінювання якості ми використовували значення асугасу та F1-score. Результати показують, що моделі ViT та Mamba мають схожу загальну точність, при цьому модель Mamba трохи краще класифікує менш представлені класи, такі як хвороба Боуена та дерматофіброма. Обидві моделі продемонстрували високі значення F1-score у випадку меланоми, що свідчить про їхню ефективність у виявленні цієї важкої форми раку шкіри.

**Висновки.** Результати свідчать, що Mamba є справжньою альтернативою ViT для класифікації раку шкіри через схожу точність. Застосування VMamba у перспективі могло б зробити діагностику раку шкіри дешевшою та більш доступною через ефективне масштабування. Надалі дослідження потрібні для вивчення інших варіантів моделі Mamba та для доопрацювання її продуктивності на більших наборах даних.

**Ключові слова:** машинне навчання; комп’ютерний зір; рак шкіри; трансформери; просторові моделі стану; VMamba.

Рекомендована Радою  
НН інституту прикладного системного аналізу  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
1 квітня 2024 року

Прийнята до публікації  
10 вересня 2024 року

DOI: 10.20535/kpissn.2024.1-4.312719

UDC 004.89+004.94]:336(045)

R.V. Tertychnyi\*, D.S. Chuprin, P.I. Bidyuk  
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine  
\*Corresponding author: romatertychnyi@gmail.com

## INFORMATION SYSTEM FOR FORECASTING NONLINEAR NON-STATIONARY PROCESSES IN FINANCE

**Background.** Financial processes are often characterised by nonlinearity and non-stationarity, which makes them difficult to accurately model and forecast. Traditional methods cannot effectively take into account the complex interrelationships and variability of such processes, which generates increased uncertainty and risks. This leads to the need to develop new information systems and methods to improve the accuracy and sustainability of forecasts.

**Objective.** The purpose of the paper is to provide a brief overview of the characteristics of nonlinear non-stationary processes, to develop a methodology for their modelling, as well as to build mathematical models based on actual statistical data and to obtain practically useful results of modelling and forecasting selected processes.

**Methods.** The methodology for modelling and forecasting nonlinear non-stationary processes is applied, models are built using data mining, such as regression models and a neural network, and the main metrics for assessing the adequacy of the model and quality of the forecast are used.

**Results.** The developed information system for modelling and forecasting nonlinear non-stationary processes is approved on real statistical data. Based on data mining methods, models of the share price dynamics of a well-known company were built. The study's results demonstrate that using an integrated approach, which includes regression models and neural networks, significantly improves the quality of forecasting variance changing in time and the nonlinear non-stationary process.

**Conclusions.** The task of high-quality forecasting of processes due to rapid, sometimes hard-to-predict changes in the external environment, i.e. external shocks, which is typical for nonlinear non-stationary financial processes, is still relevant today. The literature provides a sufficient variety of methods for modelling these processes. However, in this research, the methods that have demonstrated their advantages in modelling financial transactions in the stock market were chosen, and therefore it makes sense to expand and improve the perspectives of this approach.

**Keywords:** information system; nonlinear non-stationary processes; methodology of modelling; forecasting; regression models; neural network; finance.

### Introduction

Forecasting, as a research area in finance, economics and ecology is focused on optimising the management ideology, fully corresponds to the goals and objectives of sustainable functioning of these rather complex and important systems for humanity. The use of a modern, effective forecasting system can help in risk management, operational and strategic decision-making, and dynamic planning under conditions of uncertainty.

Effective forecasting systems include those built on the techniques of data mining and probabilis-

tic-statistical methods, which are used for modelling and predicting the development of nonlinear non-stationary processes. Such information systems are complemented by appropriate sets of statistical criteria for analyzing data quality, model adequacy, assessing the quality of forecasts and relevant alternative solutions.

Providing accurate and credible forecasts using data mining can significantly improve risk management in businesses and various financial institutions. This will help reduce potential losses and increase stability to financial market turbulences.

**Пропозиція для цитування цієї статті:** Р.В. Тертичний, Д.С. Чупрін, П.І. Бідюк, “Інформаційна система для прогнозування нелінійних нестационарних процесів у фінансах”, Наукові вісті КПІ, 1–4, с. 31–39, 2024. doi: 10.20535/kpissn.2024.1-4.312719

**Offer a citation for this article:** Vadim R.V. Tertychnyi, D.S. Chuprin, P.I. Bidyuk, “Information system for forecasting nonlinear non-stationary processes in finance”, *KPI Science News*, no. 1–4, pp. 31–39, 2024. doi: 10.20535/kpissn.2024.1-4.312719

An information system for forecasting nonlinear non-stationary processes in finance is a key tool for modern financial analysis. It integrates large volumes of data, processes and analyses complex nonlinear relationships, and adapts forecasting models to changing market conditions. The use of such a system improves the accuracy and timeliness of forecasts, which is critical for timely management decision-making. Data mining in this system contributes to a deeper understanding of financial processes, more effective risk management and increased stability of financial institutions to external shocks.

**Problem statement**

The research is dedicated to solving the following tasks: 1) to analyse the types of statistical financial processes; 2) to structure the methodology of modelling nonlinear non-stationary processes; 3) to investigate some forecasting models; 4) to build mathematical models on actual statistical data, to obtain practically useful results of modelling and forecasting, and to analyse the obtained results.

**Characteristics of statistical processes in finance**

The nonlinear non-stationary processes in finance are characterised by the complexity of their structure, which makes them difficult to model and predict. They can be divided into several types, as shown in Fig. 1 [1].

Stationary linear processes have unchanged statistical properties as time changes, so they can be easily described by autoregressive models. Non-sta-

tionary linear processes are characterised by the presence of a first-order linear trend, which makes them difficult to model and forecast due to variable mean and variance.

Partially stationary nonlinear processes have a certain degree of stability but involve nonlinear dependencies between variables. They can demonstrate stationarity under certain conditions, but their nonlinear relationships make the analysis more difficult, as simple linear methods cannot adequately capture their behaviour [2].

Integrated processes are characterised by the presence of trends of the first order or higher. They become stationary after a certain level of differentiation, which adds to the difficulty of analyzing them, as it is necessary to determine the exact level of differentiation required to achieve stationarity. This makes it difficult to build models that correctly reflect the long-term tendencies of such processes.

Cointegrated processes involve several non-stationary time series that have stable linear relationships that may be stationary. These processes are particularly difficult to forecast, as they require the identification and analysis of stable relationships between different variables that can only be revealed by long-term observations [3].

Heteroscedastic processes have a variable dispersion that depends on time and can significantly vary under the influence of external factors, such as economic changes or market crises. The dispersion instability makes these processes particularly difficult to model, as it requires taking into account dynamic changes in volatility that can significantly affect the accuracy of forecasts [4].

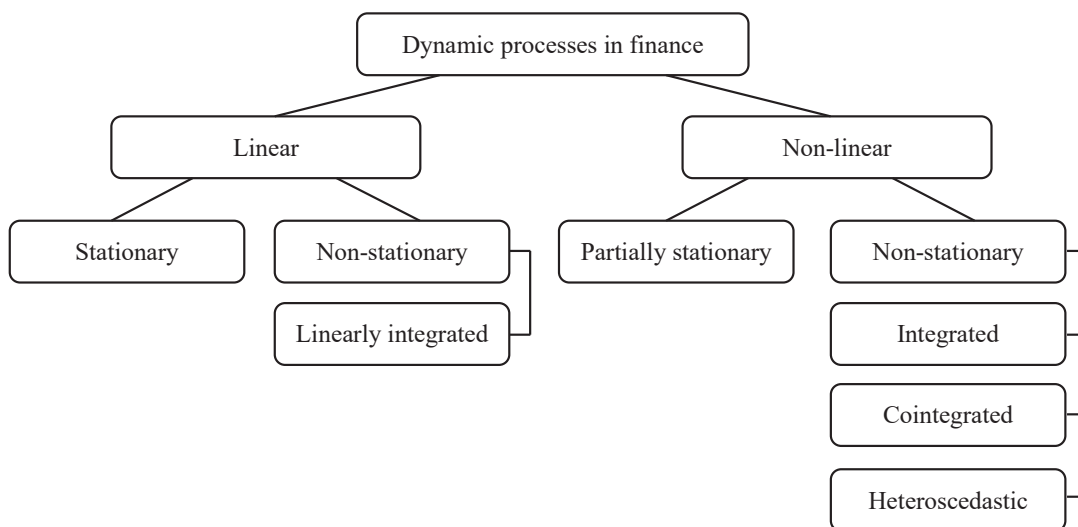


Fig. 1. Types of financial processes



These characteristics of nonlinear non-stationary processes in finance determine the difficulty of their analysis and modelling. Various nonlinear dependencies, variable trends and dispersion create challenges for analysts, requiring the use of complex approaches to improve the quality of forecasting and assessing the characteristics of these processes.

### Methodology for modelling nonlinear non-stationary processes

With all the difficulties of determining the type of time series process under investigation and its interpretation, including all the features of external shocks and uncertainties, there is a need to develop a certain methodology for modelling nonlinear non-stationary processes in finance. It can be presented in the form of the following stages:

1. Data pre-processing.
2. Analyzing the statistical characteristics of the time series.
3. Selecting model types based on time series characteristics.
4. Building selected models and calculating model adequacy criteria.
5. Evaluating the forecast and calculating forecast quality assessments.

The process of modelling nonlinear non-stationary processes begins with data pre-processing, which may include normalisation, gap filling, smoothing and filtering [5].

The next step is to analyse the characteristics of the time series, which is a set of checks for non-linearity, trend, stationarity, heteroscedasticity, and seasonality.

In financial processes, it is allowed to use the dispersion method, which helps to determine the presence of nonlinearity, using a function:

$$\Psi_{zu}(t_1, t_2) = E_{u(t_2)}[E_{z(t_1)}[z(t_1) | u(t_2)] - E_{z(t_1)}[z(t_1)]]^2.$$

This function is solved using a complex integral equation [5], [6].

The problem of nonlinearity of process forecasting can also be solved with the help of Fisher's statistical general test (f-test):

$$\hat{F} = \frac{\frac{1}{k-2} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_j} n_i (\bar{y}_i - \hat{y}_{ij})^2}{\frac{1}{k-2} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_j} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2},$$

where  $k$  – number of data groups;  $n_i$  – number of dimensions in the group;  $y_i$  – average for the

group;  $\hat{y}_{ij}$  – estimation of the process by direct regression;  $n$  – total number of dimensions [5], [7].

The assumption of linearity of the process is considered false if the statistic  $\hat{F}$  with degrees of freedom equal to  $\nu_1 = k - 2$ ,  $\nu_2 = n - k$  equal to or greater than the significance level.

The problem of stationarity of the process is solved with the help of the extended Dickey-Fuller test. The feature of this test is that the value of the dependent variable with large lag values is entered into the regression expression, which is enough to avoid the use of autocorrelation residuals during testing. This expression has the following form:

$$\Delta y(k) = a_0 + a_1 k + b y(k-1) + \sum_{i=1}^p c_i \Delta y(k-i) + \varepsilon(k),$$

where  $a_0, a_1, b, c_i$  – unknown regression coefficients [5], [8].

An important step is to determine the heteroscedasticity, i.e. the dependence of the dispersion of the process on time. This is performed using heteroscedasticity tests, such as the Breusch-Pagan (Godfrey) test or the White test. Identifying heteroscedasticity allows you to take into account the variability of dispersion in the model [5], [9], [10].

The next step is to identify seasonality in the process. This involves analyzing seasonal components to identify regular fluctuations that recur at a certain frequency, enabling more accurate modelling and forecasting.

Determining how to extract or model a trend involves determining the order of integration of the process or whether the trend can be described by one of the functions: polynomial, exponential, logarithmic, or others. Extracting the trend allows you to focus on the residuals, which represent short-term fluctuations and random components. The analysis of residuals is carried out using the autocorrelation function (ACF) and partial autocorrelation function (PACF), which helps to identify the structure of dependencies in time series [11], [12].

After analyzing all the characteristics of the time series, the modelling method is determined, which will allow describing the process in the most accurate form. Based on the selected method, the model is built and the model adequacy criteria are defined.

The model adequacy criteria allow us to assess the statistical significance of the mathematical model coefficients separately, determine the integral error of the model concerning the original time series, establish the presence of correlation between the model error values since they should be uncorrelated, and determine the degree of adequacy of the

model to the physical process as a whole. Here are some of them:

– Sum squared errors (residuals) of the model, calculated by the formula:

$$SSE = \sum_{k=1}^N e^2(k) = \sum_{k=1}^N [\hat{y}(k) - y(k)]^2 \rightarrow \min,$$

where

$$\hat{y}(k) = \hat{a}_0 + \hat{a}_1 \hat{y}(k-1) + \hat{a}_2 \hat{y}(k-2) + \hat{b}_1 x(k) + b_2 z(k);$$

$y(k)$  – data measurements;  $N$  – sample length (capacity).

– Determination coefficient  $R^2 \rightarrow 1$ , calculated by the formula:

$$R^2 = \frac{\text{var}(\hat{y})}{\text{var}(y)} = 1 - \frac{SSE}{SST},$$

where  $\text{var}(\hat{y})$  – dispersion of a part of the time series of the main variable of the equation;  $\text{var}(y)$  – is the sample dispersion of this variable;  $SSE$  – sum squared errors (residuals) of the model;  $SST = \sum_{k=1}^N [y(k) - \bar{y}]^2$  – total sum of squares  $\bar{y}$ .

– Durbin-Watson statistic (DW), which is calculated by the formula:

$$DW = 2 - 2\rho,$$

where  $\rho = \frac{E[e(k)e(k-1)]}{\sigma_e^2}$  – correlation coefficient

between adjacent error values;  $\sigma_e^2$  – dispersion of the error sequence  $\{e(k)\}$ . Thus, in the complete absence of correlation between the errors  $DW = 2$  – is the ideal value. The threshold values for  $DW$  are 0 (where  $\rho = 1$ ) and 4 (when  $\rho = -1$ ) [5], [13].

Akaike information criterion (AIC), which is calculated by the formula:

$$AIC = N \ln(\sum_{k=1}^N e^2(k)) + 2n,$$

where  $n = p + q + 1$  – number of model parameters estimated using statistical data ( $p$  – number of parameters of the auto-regression part of the model;  $q$  – number of moving average parameters; 1 appears when the bias (or cross-section) is estimated, that is  $a_0$ ) [14].

– Theile coefficient, which is calculated by the formula:

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i)^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i)^2}}.$$

The permissible values of the coefficient are  $0 \leq U \leq 1$ . The model cannot be used in forecasting when  $U = 1$ , else, when  $U = 0$  it means that the forecast series coincides with the real series, i.e. in this case the model best describes the real process.

- Student’s t-statistic.
- Fisher’s F-statistic.

The next stage is to evaluate a forecast based on the developed model. The quality of the forecast is assessed by comparing forecast values with actual data using metrics. If necessary, in case of significant errors, the previous stages are returned to adjust the model and improve the accuracy of the forecasts.

These are some of the possible methods for assessing forecast quality:

- Root mean square error:

$$MSE = \frac{1}{S} (y(k+s) - \hat{y}(k+s, k))^2 \text{ or}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{S} (y(k+s) - \hat{y}(k+s, k))^2}.$$

- Mean absolute error:

$$MAE = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S \frac{|y(k+s) - \hat{y}(k+s, k)|}{|y(k+s)|} \quad [15].$$

- Mean Absolute Percentage Error:

$$MAPE = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S \frac{|y(k+s) - \hat{y}(k+s, k)|}{|y(k+s)|} \times 100\%.$$

This comprehensive approach to modelling nonlinear non-stationary processes in finance ensures high accuracy and reliability of forecasts, taking into account all the essential characteristics of the processes.

To sum up all of the above, this methodology can be presented in the form of a flowchart in Fig. 2 [16].

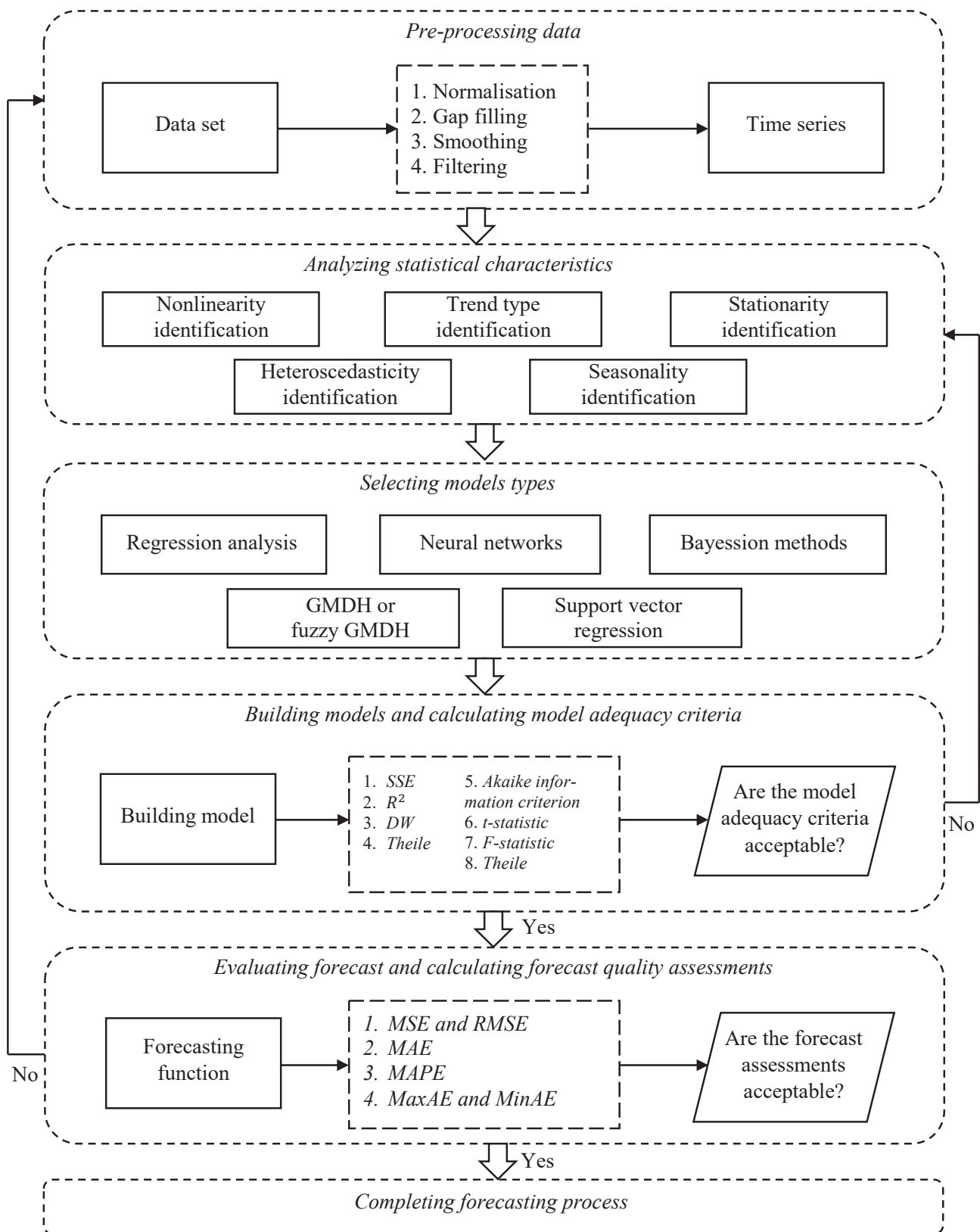


Fig. 2. Flowchart of the methodology for modelling nonlinear non-stationary processes

### Characteristics of some forecasting models

Starting from the first application of AR autoregressive models to the development of ARMA models, these time series models have become the basis for both theoretical research and practical applications. For a long time, the popularity of these models remained unchanged. Although the original ARMA framework has been extended to incorporate long-term dependence with the partially integrated ARIMA, the multi-dimensional VARMA and VARMAX models, and the non-stationarity of random fluctuations due to cointegration. The models remain important due to their ease of implementation and flexibility.

ARCH models are widely used to model volatility in financial and economic processes. The main purpose of implementing ARCH models is to assess and forecast risk in financial time series by modelling the variable (conditional) dispersion.

Autoregressive conditional heteroskedastic model (ARCH) with order  $p(\geq 1)$  is defined as:

$$X_t = \sigma_t \varepsilon_t \text{ and } \sigma_t^2 = c_0 + b_1 X_{t-1}^2 + \dots + b_p X_{t-p}^2,$$

where  $c_0 \geq 0, b_j \geq 0$  – constants,  $\{\varepsilon_t\} \sim IID(0,1)$  and  $\varepsilon_t$  is independent of  $\{X_{t-k}, k \geq 1\}$  for all values of  $t$ . A stochastic process  $\{X_t\}$  defined by the equations above is called the *ARCH(p)* process. [17]

The basic concept of their construction is that the distribution  $X_t$ , which is predicted on the basis of previous values, is a scaling transformation of the distribution  $\varepsilon_t$  with a scaling constant  $\sigma_t$ , which depends on the past values of the process. This makes it easy to estimate the conditional clusters of  $X_t$  based on its previous values [17].

The advantages of the ARCH model include the ability to detect and model volatility clusters when large changes in volatility are concentrated in certain periods. This is an important characteristic of financial markets, especially during crises or periods of instability.

The disadvantages of this model include the following: positive and negative model shocks have the same effect on volatility, as it depends on the square of previous shocks, but the price of a financial asset has different responses to these shocks; higher-order models have certain limitations; ARCH models describe the dynamics of conditional dispersion well, but do not provide an understanding of the causes of such dynamics of the financial process; models may overestimate volatility, as they tend to react slowly to significant isolated shocks in a time series [18].

The ARCH model has been extended for economic and statistical reasons. In particular, a significant development is the inclusion of a moving average component, in particular the generalised model (GARCH).

The generalised autoregressive conditional heteroscedastic model (GARCH) with the order  $p(\geq 1)$  and  $q(\geq 0)$  is defined as:

$$X_t = \sigma_t \varepsilon_t \text{ and } \sigma_t^2 = c_0 + \sum_{i=1}^p b_i X_{t-i}^2 + \sum_{j=1}^q a_j \sigma_{t-j}^2,$$

where  $c_0 \geq 0, b_i \geq 0, a_j \geq 0$  – constants,  $\{\varepsilon_t\} \sim IID(0,1)$  and  $\varepsilon_t$  is independent of  $\{X_{t-k}, k \geq 1\}$  for all values of  $t$ . A stochastic process  $\{X_t\}$  defined by the equations above is called the *GARCH(p,q)* process [17].

The main idea of creating the GARCH model is to extend the ARCH model to more flexible and accurate modelling of financial time series volatility.

In the GARCH model, the conditional dispersion depends not only on the previous residuals, but also on the previous values of the dispersion itself. This allows for taking into account more complex dependencies in volatility and providing more accurate forecasts, especially when volatility is high and changes over time, which is its advantage. Other advantages include the model's ability to take into account both short-term and long-term components of volatility.

The GARCH model has the same disadvantages as the ARCH model. For example, it reacts equally to both positive and negative shocks. Moreover, the results of empirical research on high-frequency financial time series indicate that GARCH models are limited in their ability to reproduce the extremes of the distribution, even when standardised corrections are applied.

LSTM (Long Short-Term Memory) models are a type of recurrent neural network (RNN) designed to process sequential data efficiently. A key feature of LSTMs is their ability to store long-term dependencies due to a special structure of memory blocks and three types of gates:

- Forget gate:  $f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f)$ , where  $W_f$  – weighting coefficients;  $x_t$  – input signal;  $h_t$  – memory block output;  $b_f$  – shift vector.
- Input gate:  $i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i)$ ,  $\tilde{C}_t = \text{tanh}(W_C \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_C)$  where  $\tilde{C}_t$  – vector of new candidate values.
- Output gate:  $o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o)$ ,  $h_t = o_t * \text{tanh}(C_t)$ , where  $C_t = f_t * C_{t-1} + i_t * \tilde{C}_t$  – is the state of the memory block at time  $t$  [19].

The main idea of using LSTM models is the ability to handle complex, nonlinear and

non-stationary dependencies in time series. Due to their memory block architecture, they are able to store long-term information and take into account complex patterns in the data, which allows for more accurate forecasting of future financial performance.

The advantage of LSTM models is the use of gates, which avoids the problem of gradient damping, which is common in traditional RNN [20].

Among the disadvantages are the following: tendency to overfitting, which requires the use of regularisation methods (dropout, early stopping); the need to correctly adjust hyperparameters; complexity of the architecture.

### Practical results of the research

Let us consider the building of several proposed models for short-term forecasting of the nonlinear non-stationary financial process of price dynamics at the close of trading of the well-known AMD company during 2017–2022. The data sample contained 1510 elements, 1434 of which were used as a training sample (95 %), and 76 to check the forecasting results (5 %).

In order to objectively select the orders of the ARIMA model, ACF were built at 40 lags. Based on the results of the building of these functions, it was decided that models can be built with the parameter  $p$ , corresponding to the first, second or thirteenth order. Based on the data autocorrelation graph, it was decided to use a second order moving average model of  $q = 2$ . Also  $d = 1$  was determined.

The GARCH model was built with the first order of symmetric innovation  $p = 1$  and the first order of transformed conditional dispersion  $q = 1$ . The standardised Student's distribution was chosen as the probability distribution function.

The LSTM neural network was built on the basis of the Adam optimiser. The network configuration includes 100 epochs and a batch size of 64. Testing was performed with configurations of 50, 100, and 150 epochs. Since the difference between 50 and 100 epochs was significant, and the difference between 100 and 150 epochs was almost imperceptible, the optimal number of epochs was chosen to be 100. The loss function in the constructed network is the mean absolute error.

Comparative Table 1 below shows the results of modelling and forecasting of ARIMA(2,1,2), GARCH(1,1) and LSTM neural

network based on a dataset of AMD's price dynamics.

Table 1. Results of the built models

Type of model	Adequacy criteria		Forecast assessment		
	$R^2$	DW	MSE	RMSE	MAE
ARIMA(2,1,2)	0.8433	1.9820	6.0518	2.4600	1.7882
GARCH(1,1)	0.3458	2.1010	0.0019	0.0435	0.0341
LSTM	0.8427	1.9978	6.3296	2.5159	1.8653

Analyzing the results of modelling and forecasting from the comparative table, which shows the criteria for adequacy and forecast assessment of the built models, it is possible to conclude that all models have quite good results based on the calculated statistics.

It can be seen that in the considered models,  $R^2$  moves towards one and  $DW$  moves towards two, which is an indicator of the efficiency of using the models. Similarly, the forecast assessment scores tend to their best value.

The visual analysis of the graphs of the forecasts of each model shows the following: the ARIMA model correctly identifies price trends and has minimal discrepancies with actual values in the forecast period; changes in stock prices using the GARCH model do not always correctly identify price trends and sometimes have relatively significant discrepancies with actual values; the LSTM neural network effectively reflects price trends and demonstrates minimal discrepancies with actual data in the forecast period. For example, Fig. 3 shows the results of forecasting the LSTM neural network, which can be used as one of the tools for making investment decisions.

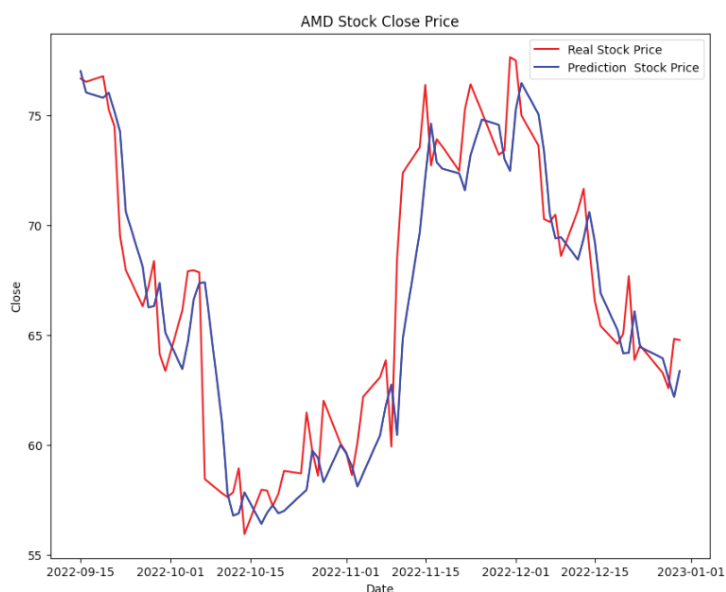


Fig. 3. Forecasting AMD price dynamics by LSTM neural network



## Conclusions

This work has investigated the problem of forecasting nonlinear non-stationary financial processes, which are difficult to model accurately due to their variability and complex interrelationships. Traditional methods often do not take these features into account, which leads to increased uncertainty and risks. For this reason, an information system has been proposed to improve the accuracy and reliability of forecasts.

In the research, there was performed a brief review of the characteristics of nonlinear non-stationary processes and a methodology for their modelling was developed. Data mining methods, including regression models and neural networks, were used to build mathematical models. The main metrics for assessing the adequacy of models and forecasts ensured the accuracy of the results obtained.

The developed information system was tested on real statistical data, in particular, on the dynamics of share prices of one of the companies. The use of an integrated approach, including regression models and

neural networks, has shown a significant improvement in the quality of forecasting the dispersion variable and the nonlinear non-stationary process itself. The results of the research confirmed that the use of data mining methods allows achieving more accurate and reliable forecasts, which is important for effective financial risk management.

Therefore, the results of this study confirm that the development of new information systems using data mining techniques is necessary to improve the accuracy and reliability of forecasting nonlinear non-stationary financial processes, which contributes to more effective financial risk management and stability of financial institutions.

Future research perspectives include expanding the range of models used to build forecasts, in particular by integrating more modern machine learning methods and other innovative approaches. It is also reasonable to expand the information system by adding automation elements to the data analysis process. This will allow faster and more accurate modelling of complex financial processes and adaptation of forecasts to changing market conditions.

## References

- [1] C. Cheng, et al., “Time series forecasting for nonlinear and non-stationary processes: a review and comparative study”, *Iie Transactions*, pp. 1053–1071, 2015.
- [2] A. Hasanzadeh, et al. “Piecewise stationary modeling of random processes over graphs with an application to traffic prediction”, *IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, pp. 3779–3788, 2019
- [3] Y. Chang, J.Y. Park, P.C. Phillips, “Nonlinear econometric models with cointegrated and deterministically trending regressors”, *The Econometrics Journal*, 4.1, pp. 1–36, 2001.
- [4] J.Y. Park, “Nonstationary nonlinearity: An outlook for new opportunities”, *Mimeographed, Department of Economics, Rice University*, pp. 21–23, 2003.
- [5] P.I. Bidyuk, L.O. Korshevnyuk, *Design of computer information systems for decision support*. Kyiv: Educational book, ESC “IASA” NTUU “KPI”, 2010, 340 p.
- [6] K. Turkman, M.G. Scotto, Z.B. Patrѐncia, *Non-linear time series*. Switzerland: Springer Publications, vol. 30, 2014, pp. 121–193.
- [7] H. Tsai, K.S. Chan, *Testing for nonlinearity with partially observed time series*. Great Britain: Biometrika, 2000, pp. 805–821.
- [8] C. He, R. Sandberg, *Dickey–Fuller type of tests against nonlinear dynamic models*. Stockholm: Oxford Bulletin of Economics and Statistics, 2006, pp. 835–861.
- [9] A.B. Abdul-Hameed, O.G. Matanmi, “A modified Breusch–Pagan test for detecting heteroskedasticity in the presence of outliers”, *Pure and Applied Mathematics Journal*, Nigeria, 2021, pp. 139–149.
- [10] J.A. Visek, “Empirical distribution function under heteroscedasticity”, *Statistics*, 45(5), Czech Republic, 2011, pp. 497–508.
- [11] S. Bianconcini, E.B. Dagum, P. Maass, T. Alexandrov, T.S. McElroy, “A review of some modern approaches to the problem of trend extraction”, *Econometric Reviews*, 31(6), Washington, 2012, pp. 593–624.
- [12] T. Alexandrov, “A method of trend extraction using singular spectrum analysis”, *Center for Industrial Mathematics*, Germany, 2008, pp. 1–23.
- [13] J.M. Dufour, M.G. Dagenais, “Durbin–Watson tests for serial correlation in regressions with missing observations”, *Journal of Econometrics*, 27(3), Canada, 1985, pp. 371–381.
- [14] J.E. Cavanaugh, A.A. Neath, “The Akaike information criterion: Background, derivation, properties, application, interpretation, and refinements”, *Wiley Interdisciplinary Reviews, Computational Statistics*, 11(3), Iowa, 2019, pp. 1–11.
- [15] T.O. Hodson, “Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): When to use them or not”, *Geoscientific Model Development Discussions*, USA, 2022, pp. 5481–5487.

- [16] P.I. Bidiyuk, et al., “Adaptive modeling and forecasting economic and financial processes”, *Informatics and Mathematical Methods in Simulation*, vol. 9, no. 4, Ukraine, 2019, pp. 231–250.
- [17] J. Fan, Q. Yao. *Nonlinear Time Series: Nonparametric and Parametric Methods*. New York: Springer, 2003, pp. 143–179.
- [18] R.S. Tsay, *Analysis of financial time series*. Chicago: Wiley & Sons, Ltd., 2010, pp. 115–140.
- [19] A. Sagheer, M. Kotb, “Time series forecasting of petroleum production using deep LSTM recurrent networks”, *Neurocomputing*, pp. 203–213, 2019.
- [20] S. Siami-Namini, N. Tavakoli, A.S. Namin. “A comparison of ARIMA and LSTM in forecasting time series”, *International conference on machine learning and applications (ICMLA)*, Texas, 2018, pp. 1394–1401.

Р.В. Тертичний, Д.С. Чупрін, П.І. Бідюк

#### ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ НЕЛІНІЙНИХ НЕСТАЦІОНАРНИХ ПРОЦЕСІВ У ФІНАНСАХ

**Проблематика.** Фінансові процеси часто характеризуються нелінійністю та нестаціонарністю, що ускладнює їх моделювання та прогнозування. Традиційні методи не можуть адекватно врахувати складні взаємозв'язки та мінливість таких процесів, що призводить до підвищеної невизначеності і появи ризиків. Це зумовлює необхідність розробки нових інформаційних систем і методів для підвищення точності та надійності прогнозів.

**Мета дослідження.** Виконати короткий огляд характеристик нелінійних нестаціонарних процесів, розробити методологію їх моделювання, а також виконати побудову математичних моделей на фактичних статистичних даних і отримати практично корисні результати моделювання і прогнозування вибраних процесів.

**Методика реалізації.** Застосовано методологію моделювання й прогнозування нелінійних нестаціонарних процесів, побудовано моделі за допомогою методів інтелектуального аналізу даних, а саме регресійні моделі та нейронну мережу, також використано основні метрики для оцінювання адекватності моделі та прогнозу.

**Результати дослідження.** Розроблену інформаційну систему для моделювання та прогнозування нелінійних нестаціонарних процесів апробовано на реальних статистичних даних. На основі методів інтелектуального аналізу даних було побудовано моделі динаміки цін акцій однієї з відомих компаній. Результати дослідження продемонстрували, що використання комплексного підходу, який включає регресійні моделі та нейронні мережі, значно покращує якість прогнозування змінної в часі дисперсії і самого нелінійного нестаціонарного процесу.

**Висновки.** Задача високоякісного прогнозування процесів внаслідок швидких, часом погано передбачуваних змін зовнішнього середовища, тобто збурюючих впливів, що характерне для нелінійних нестаціонарних фінансових процесів є актуальною і сьогодні. У літературі подано достатню варіативність методів моделювання цих процесів. Проте в цьому дослідженні обрані саме ті методи, які продемонстрували свої переваги в моделюванні фінансових операцій на фондовому ринку, а тому є сенс розширювати та вдосконалювати перспективи цього підходу.

**Ключові слова:** інформаційна система; нелінійні нестаціонарні процеси; методологія моделювання; прогнозування; регресійні моделі; нейронні мережі; фінанси.

Рекомендована Радою  
НН інституту прикладного системного аналізу  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
16 вересня 2024 року

Прийнята до публікації  
10 жовтня 2024 року

DOI: [orcid.org/10.20535/kpissn.2024.1-4.315079](https://doi.org/10.20535/kpissn.2024.1-4.315079)

UDC 004.89:303.732.4

Volodymyr Savastiyanyov<sup>1\*</sup>, Mykhailo Stoliar<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine  
\*Corresponding author: [vvs.in.ua@gmail.com](mailto:vvs.in.ua@gmail.com)

## SYSTEM APPROACH TO THE COMBINED USE OF LARGE LANGUAGE MODELS AND CLASSICAL MODELS IN FORESIGHT TASKS

**Background.** Large Language Models (LLMs) and their associated agents have spread wide technology and represent a significant advancement in recent times. These state-of-the-art models expose valuable potential, but they are not devoid of restrictions, inefficiencies, and limits. This article investigates the exploration of these constraints within specific domain areas and prediction problems as examples.

**Objective.** The article highlights features offered by GPT-based models and compares the conclusions with classical methods of textual data analysis in classification tasks using the prediction methodology as an example. The purpose of the study is to develop a system approach to the combined use of traditional machine learning approaches as a practical alternative to LLMs in foresight tasks using the example of STEEP analysis, which provides an opportunity to obtain valuable information from textual data.

**Methods.** The study is structured into four segments, each addressing distinct parts: Data Mining, text pre-processing using LLMs, text pre-processing utilizing Natural Language Processing (NLP) methods, and comparative analysis of results. Data Mining includes data collection and data pre-processing stages for train and test observations. For the utilization of LLMs, chains of thought techniques and prompt engineering were used.

**Results.** Throughout this study, it was acknowledged that the LLMs can be used in combination with classical machine learning methodologies for domain-specific areas in STEEP analysis under Foresight tasks. The outcome revealed a model that was developed significantly faster and with less complexity compared to LLMs such as GPT and Mistral. Increasing the number of models employed leads to more stable results.

**Conclusions.** The main result of the proceeding is that the patterns that reveal LLMs under certain settings can also be identified by classical models. Moreover, augmenting the deployment of LLMs during the data preparation stages contributes to heightened stability in outcomes. Using classical models combined with LLMs speeds up response times during inference and reduces operating costs for running models.

**Keywords:** system analysis; foresight; textual analytics; classification; LLM; NLP.

### Introduction

The new area of digitalization has opened the potential insights from textual data, including news articles, social media posts, emails and user comments. A significant challenge for researchers and business lies in structuring this information for future demands, such as content generation, possible targeted recommendations, and value enhancement [1]. These tasks are equally relevant in the government sector, particularly in the realm of strategic management and planning, where ongoing analysis of information from external and internal sources not only helps to address current needs but

also enables long-term planning for decades ahead. Specifically tailored for long-term planning within government structures, the foresight methodology [2] has been developed, and actively implemented across all levels of government management bodies [3]. In numerous foresight processes, it is crucial to engage experts, stakeholders, and citizens in innovative workshops and strategic dialogues aimed at making sense of complex issues (or futures). According to the methodology, these tasks involve creative and mathematical techniques for constructing the future through various workflows, which process formatted and formalized knowledge as semi-structured and textual data through the cognitive efforts of experts,

**Пропозиція для цитування цієї статті:** В.В. Савастьянов, М.В. Столяр, “Системний підхід до комбінованого використання великих мовних та класичних моделей в задачах передбачення”, *Наукові вісти КПІ*, № 1–4, с. 40–48, 2024. doi: [orcid.org/10.20535/kpissn.2024.1-4.315079](https://doi.org/10.20535/kpissn.2024.1-4.315079)

**Offer a citation for this article:** Volodymyr Savastiyanyov, Mykhailo Stoliar, “System Approach to the Combined Use of Large Language Models and Classical Models in Foresight Tasks”, *KPI Science News*, no. 1–4, pp. 40–48, 2024. doi: [orcid.org/10.20535/kpissn.2024.1-4.315079](https://doi.org/10.20535/kpissn.2024.1-4.315079)



specialists, and mathematical models. A substantial hurdle presents itself in automating these workflows, particularly from the initial stage of processing incoming information. Some of these workflows and creative methodologies can leverage modern NLP approaches, yet they encounter typical NLP task problems such as data annotation. This process remains labor-intensive and time-consuming for numerous NLP tasks. While there are several methods available to generate pseudo-data labels, these methods are typically specific to particular tasks and initially require a substantial volume of labelled data. The introduction of the extensive language model GPT-3, which boasts 175 billion parameters, has significantly enhanced performance across various few-shot learning tasks. In [4] was investigated the potential of utilizing GPT-3 in combination with human labelling as an economical data labelling tool to train other models. Shuohang Wang and colleagues provide numerous tables and indicators that identify effective combinations of a person and GPT for specific datasets. However, they have not shown which traditional machine learning models can achieve similar performance to any Human&LLM combination within a smaller budget. In this article, we are going to investigate such powerful tools like Large Language Models (LLMs) in specific domains, focusing on the machine learning paradigm of Zero-Shot Classification, which operates without pre-labelled data, new progressive developed chain of thought and Prompt Engineering methodology [5]. Using it in LLM is important for several reasons: clarity (clear and understandable information), coherence (the logical connection between ideas), persuasiveness (cases more compelling), credibility (well-reasoned insights), problem-solving (systematically analysing the problem) etc. Overall, a special chain of thought and Prompt Engineering in communication with LLMs enhances their ability to engage in dynamic, contextually aware, and insightful interactions, leading to more meaningful and productive communication experiences. The second step is to estimate the influence of text data on the domain. Our dataset, parsed from the beginning of 2011 to the end of 2023, includes over 120,000 records of news headlines extracted from trusted and popular sources like The Guardian, Time, 9News, FreightWaves, Journal of Commerce, and The Times of Earth. The domain-specific area is the logistics sector within the USA market, aiming to provide a comprehensive overview over the specified period. The data includes information not only from the target domain. It was chosen for a more general result. To be more precise, this study is deep

into whether traditional machine learning methods, for example, TF-IDF and Logistic Regression, can be used as valuable alternatives to LLMs for specific analytical tasks (classification). A successful substitution would suggest that the data contains identifiable patterns that LLMs and traditional methods can accurately recognize. Moreover, it would underscore the importance of these patterns in informing the effectiveness and reliability of various computational techniques employed in linguistic analysis. Additionally, the paper would elucidate the implications of such findings for advancing the field of NLP and optimizing the performance of LLMs in real-world applications. Our research is not to solely investigate the classification prowess of LLMs across diverse domains. Rather, we aim to explore the feasibility of substituting LLMs with conventional approaches grounded in established methodologies. As a result, we can decrease the amount of energy and expense used for inference LLMs. As we know, to be comfortable working with LLMs you need GPU accelerators. It is expensive and not environmentally friendly (CO<sub>2</sub> emissions during inference). This exploration could potentially challenge the dependence on LLMs and represent the objectivity of the knowledge base and their hallucination effect.

### Problem Statement

In recent years, there has been significant research into NLP technologies, including both LLMs and traditional machine learning techniques. The application and estimation of these methods have become critical in understanding their relative strengths and weaknesses. For example, in [6], the potential of NLP, specifically topic modelling, is discussed for identifying differences between citizen-derived foresight and institutional foresight, enhancing strategic foresight processes. In [7], the use of machine learning (ML) and NLP for analysing large sets of media texts are investigated, aiming to underline the foresight process by identifying future-oriented statements and trends. This paper seeks to bridge the gap by evaluating the performance of classical machine learning techniques against LLMs in natural language processing tasks, addressing the extreme popularity in the media of new progressive models, and estimating their practical applications. The authors discovered the utilization of textual analytics within the Foresight process [8], yet encountered a formidable challenge in surpassing the capabilities of cutting-edge textual analytics technologies such as LLM. In the related works [9–12], GPT models were explored on tasks using machine learning

paradigms zero-shot, one-shot, and few-shot classification. They found that GPT zero-shot performance is significantly weaker than few-shot performance in tasks like reading comprehension, question answering and classification. You can see it by differences in the f1-score (and other provided metrics) for different classification datasets. The main hypothesis is that without few-shot observations, it becomes more difficult for models to perform effectively. Overall, these findings shed light on the nuanced dynamics underlying the performance of LLMs in different learning problems, highlighting the pivotal influence of data availability, size and quality, and model training configurations like optimization algorithm, batch size, learning ratio, and so on for task effectiveness. To address the combination challenge of union Foresight studies [13] and LLMs, an approach is introduced to integrate future modelling into the existing learning frameworks [14]. By employing the subject trajectory, which serves as a structured representation of consecutive frame sequences, as a learning objective, the goal is to establish dependencies between past and future contexts. They have proposed two innovative methodologies, namely Foresight Pre-Training (FPT) and Foresight Instruction-Tuning (FIT), to endow MLLMs with predictive capabilities, drawing inspiration from the contemporary learning paradigms observed in Language Models (LMs) [15]. In our work, we are going to investigate the classification task on the example of STEEP analysis, as a part of foresight study, using special techniques like prompt engineering and chain of thought in a domain-specific area -

the logistic market in the USA. The main goal of the work is to figure out that LLMs can see patterns in text data (news headlines) and strictly recognize them and then create ML techniques that solve this task with similar quality to save computational time and fee for LLM clouds. Such an approach brings benefits not only within scientific circles but also across various domains. Industries can extract the predictive capabilities of LLMs and NLP methodology empowered with foresight studies to enhance decision-making processes, optimize resource allocation, and anticipate market trends.

## Methods

The process flow of the system approach, as illustrated in Fig. 1, involves using panels, experts, analysts, and tools to generate or collect text documents in a foresight study (data discovery step). These documents are tagged using LLMs in STEP 1, despite the potential cost inefficiency. In STEP 2, a classical machine learning model is trained with the tagged data. STEP 3 involves deploying the trained ML model for predictions or analyses. This systematic approach focuses on the comparative evaluation and cost assessment of LLMs and classical machine learning techniques, to achieve an optimal balance between performance and cost-efficiency in NLP tasks within the context of foresight studies. It emphasizes the combined use of large language models and classical models to enhance the effectiveness and efficiency of foresight-related analyses.

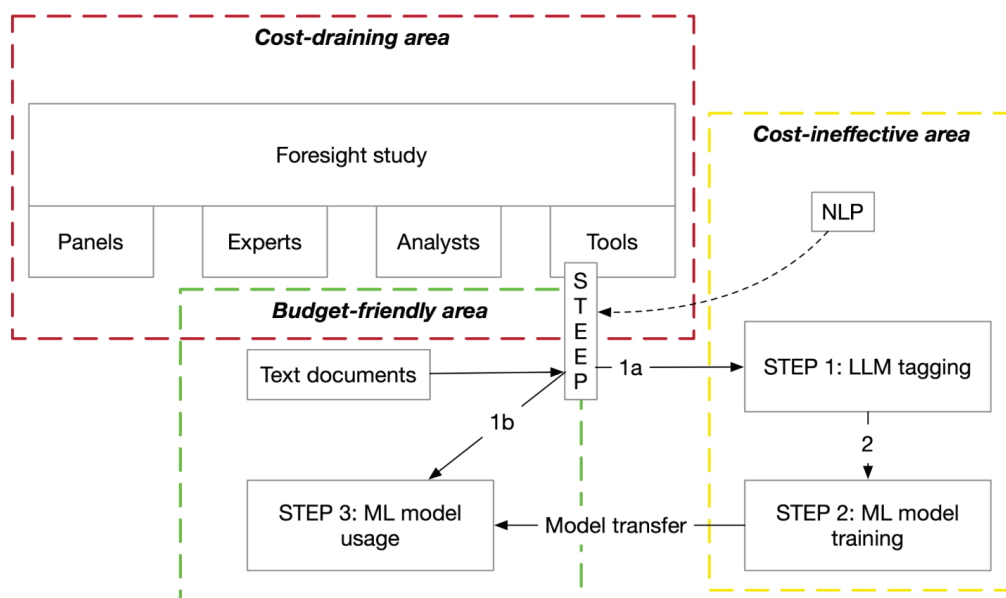


Fig. 1. Integrating Cost-Effective Strategies in Foresight Studies: A Dual-Step Approach with LLM Tagging and ML Model Optimization

The cost implications encompass three distinct zones: the cost-draining area, the cost-ineffective area, and the budget-friendly area, distinguished by red, yellow, and green dashed borders respectively. According to our methodology, the Foresight process falls within the cost-draining area due to its reliance on labor-intensive organizational and creative activities. However, in our study, we employ NLP tools for Foresight activities (STEEP analysis as an example, there can be other approaches depending on classification), potentially automating certain tasks and optimizing budget allocation. System approach to the combined use of large language models and classical models in a budget-friendly area aims to streamline processes and enhance cost-effectiveness in Foresight.

### Data Collection

Data collection is a key component in the major of research works [16], especially for those, who are centered around language models (LMs). Within this domain, an array of diverse textual datasets exists, each offering unique insights and challenges. It can be books, papers, subtitles, messages, news, to name a few. In this study, a dataset has been compiled, encompassing news headlines starting from 2011 to the end of 2023. We have to admit that emphasizing the inclusion of data from the most recent timeline (2023) is important for analysis, as certain LLMs may have been trained on older data, potentially influencing their performance. While our primary focus is not centered on the utilization of historical data in LLM training processes, we prioritize minimizing data leaks [17] and ensuring the stability of our results. The main sources of data are The Guardian, Time, 9News, FreightWaves, Journal of Commerce, and The Times of Earth. The data includes more than 120,000 records for the targeted period.

### Large Language Models as experts

In recent years, the intersection of Foresight methodologies and Language Models (LLMs) has become more promising across academic, commercial, and industrial domains. Foresight, the ability to anticipate future developments, trends or needs, has long been a wished tool in various fields. Meanwhile, LLMs have revolutionized natural language processing, demonstrating remarkable proficiency in understanding and generating human-like text, also describing the logical chain of future reason-

ing. There are a lot of LLMs that are accessible to users and researchers like GPT, LLAMA, Mistral, BART, GEMINI, etc. The primary difference between them lies in architecture variance, number of parameters, and text corpora for training. In these experiments, we stop on GPT-3.5-turbo and Mixtral-8x7B-Instruct-v0.1 (Mistral) as base LLMs. The anchor parameter was chosen  $\text{top}_k = 50$  for text generation for both models [18]. The selection of benchmark LLMs such as GPT and Mistral for our study is underpinned by several factors, each contributing to the comprehensive evaluation and comparison: established performance (robust performance across various NLP tasks), architectural significance (built upon transformer architectures), large-scale pre-training (pre-training on vast text corpora, diverse linguistic contexts and domains), availability and accessibility (publicly available). In this paper, we consider GPT and Mistral models as leading experts in the field of logistics. These models show robust results in news classification tasks [19]. The hypothesis is that they are two independent experts, whose knowledge base was fulfilled during the training procedure. To extract that knowledge we use prompt engineering and chain of thoughts. For the zero-shot classification, we use STEEP categories [20] (as an example) according to Foresight methodology [2]. The process of the STEEP analysis involves a deep exploration of external environmental factors. This analytical framework divides the scope into Social, Technological, Economic, Environmental, and Political categories, which lead to a comprehensive view of external influences on trends. It is used in decision-making systems, strategy planning, and other Foresight tasks. As we mentioned before, our LLMs hold expertise in the area of logistics. The utilization of appropriate instructions or prompts is imperative to effectively extract knowledge from LLMs, and then to transfer them to domain experts. This process involves carefully selecting prompts that guide the attention layers of models toward the desired information, thereby enhancing its ability to generate relevant and accurate responses with the minimization of hallucinations. The team has compiled a comprehensive list of prompts, guided by our perspective. They are well-suited to the task of determining the impact of current headlines on the logistics industry, assigning a rating ranging from 1 to 10. The combined prompt includes instructions for classification and estimation tasks for multiple observations, see Algorithm 1.

**Algorithm 1**

Base prompt

---

```

[INST]
  You are a TOP LEVEL LOGISTIC ANALYST with twenty years of experience.
  The task is to classify news headlines in [INPUT]. Estimate the impact of each headline on the USA LOGISTIC MARKET.
[Rules]
  For classification use STEEP analysis.
  There are a total of five classification categories: Social, Technological, Economical, Environmental, and Political.
  Each text has one, two or three categories. Be aware. Estimation measures from 1 to 10. The higher rank the stronger impact of
  headline on the USA LOGISTIC INDEX.
  Use the Example to format the output data: headlines | classes | impact
[End of Rules]
[Examples]
  Pics of the week: Fields of red honour the fallen on Remembrance Day | Social, Environmental | 2
  Rare echidna found for the first time in 62 years | Environmental | 3
  Afghan girls win EU prize for farm robot | Technological | 1
  Ice slip victims filmed instead of warned | Political | 1
  Fuel shortage leads to increase in shipping costs for logistics companies | Economic | 8
[END Examples]
[/INST]
[INPUT]
  "{text}"
[OUTPUT]

```

---

The prompt consists of the instruction, which transfers LLM to be an expert in the domain area (USA logistic market), the rules of output generation, which determines a consistent chain of generation in strict order, examples of desired output, and field of “text” inputs. In other words, the prompt determines not only the role of the assistant (identity and instructions) but also includes represented examples of the desired output. This is the way we utilize prompt engineering and chain of thought methodology to achieve efficiency in generation with a minimum of hallucinations.

**ML model training and inference**

Natural Language Processing (NLP) stands at the frontline position of modern computational linguistics methodology, offering a multifaceted approach to understanding and processing human language. NLP methods serve as a bridge to the gap between human communication and machine understanding [21]. NLP includes not only approaches to work with text data but also has metrics to evaluate achieved results. These metrics provide quantitative measures of model accuracy, coherence, fluency, and other relevant attributes. In our study, the text corpus is pre-processed by lemmatization and the removal of stopwords, ensuring that only meaningful content remains for subsequent analysis. Following pre-processing, the transformed text data is then encoded into machine-readable features using the Term Frequency-Inverse Document Frequency (TF-IDF) [22–23] approach with bigrams. This transformation allows us to represent the tex-

tual data in a numerical format. Logistic Regression is a fundamental statistical and machine-learning technique used for classification tasks. In this study, it was used as a baseline machine learning algorithm. The core idea behind the method is to find a relationship between features and the probability of a particular outcome. As the TF-IDF approach was used in the text pre-processing step, Logistic Regression is a proper choice due to the number of input features [24]. For result estimation, standard metrics such as precision, recall, and F1-score are utilized. Given the prevalence of imbalanced classes within the real data, similar to our dataset, we opt for the use of macro average and weighted average aggregation methods to ensure a more precise evaluation of the final metrics.

**Results**

In the previous steps of the work: the dataset was collected, consisted of news headlines, configured experts (prompt with generation parameters for GPT and Mistral models), and generated classes with estimated impact value to domain area for each observation. The hypothesis of this research aims to explore potential dependencies within the dataset and target STEEP classes, and estimated impact on domain area. Additionally, it seeks to level out the hallucination effect of generated information. The Proof of concept was achieved with the help of classic machine learning methods in the Natural Language Processing (NLP) field. In the first step, we split data to train and test in proportion 4:1 with stratification by target class. A text corpus is



pre-processed with the TF-IDF approach with bigrams. It transforms text into features. In the second step, we take Logistic Regression as a benchmark machine learning model. The classification report for the STEEP classes is represented in Table 1 by the first expert assumption.

**Table 1.** STEEP classification report (GPT)

Class	Precision	Recall	F1 score	Sample
Economic	0.84	0.89	0.86	7006
Environment	0.89	0.7	0.78	1383
Politic	0.83	0.85	0.84	5266
Social	0.79	0.76	0.78	4206
Technology	0.78	0.75	0.76	3548
weighted avg	0.82	0.82	0.82	21468

The classification report for the STEEP classes is represented in Table 2 by second expert assumption.

**Table 2.** STEEP classification report (Mistral)

Class	Precision	Recall	F1 score	Sample
Economic	0.76	0.85	0.8	8089
Environment	0.76	0.56	0.65	1317
Politic	0.72	0.78	0.75	5705
Social	0.66	0.56	0.6	3290
Technology	0.71	0.63	0.66	4499
weighted avg	0.73	0.73	0.72	22900

The classification report for the STEEP classes is represented in Table 3, where both experts have a consensus in class prediction.

**Table 3.** STEEP classification report (Consensus)

Class	Precision	Recall	F1 score	Sample
Economic	0.88	0.94	0.92	5799
Environment	0.94	0.69	0.8	866
Politic	0.88	0.9	0.89	3959
Social	0.84	0.76	0.8	2136
Technology	0.85	0.83	0.83	2578
weighted avg	0.87	0.87	0.87	15338

In the third step, an attempt is made to replicate the experiment to estimate the impact in the domain area. The results are represented in Table 4 for the combination of models. It is evident from the figure that even the predictions made by a multitude of models are not recognizable by conventional methods.

**Table 4.** Classification report of impact (Consensus)

Class	Precision	Recall	F1 score	Sample
1	0.73	0.57	0.64	371
2	0.37	0.15	0.21	279
3	0.32	0.28	0.3	382
4	0.26	0.46	0.33	521
5	0.20	0.11	0.13	393
6	0.25	0.26	0.26	461
7	0.25	0.28	0.30	510
8	0.32	0.25	0.28	370
9	0.45	0.33	0.38	289
weighted avg	0.34	0.32	0.31	3576

In exploring the cost-efficiency of Large Language Models, it is important to analyse how our approach can reduce operational expenses. OpenAI's GPT-3.5 Turbo, for example, operates at a cost of  $\$6 \cdot 10^{-4}$  per 1000 tokens. By optimizing calculations to run on CPUs, our model significantly reduces this cost to  $\$3.5 \cdot 10^{-12}$  per 1000 tokens.

## Conclusions

This study has demonstrated the feasibility and efficacy of employing traditional machine learning methods as viable substitutes for Large Language Models (LLMs) in conducting classification tasks like STEEP analysis, for example, as a part of foresight study, within specific domain areas. This study is applicable to any classification tasks inside the foresight methodology. By systematically comparing the performance of classic classification models, like logistic regression to a valuable substitution of state-of-the-art LLMs, which are overestimated in social prospect. Logistic regression has a better performance based on labelling from GPT than the Mistral model by weighted average F1 score. It can be explained as the varying number of parameters in LLMs and text of different size (including text streams) in the training corpora. Also, taking a swarm of models and their combination for prediction (consensus), we can achieve significantly improved and more robust results. Logistic regression has a weighted average F1 score of 0.87, see Table 3. This experiment proves that the data has some special features (keywords and dependencies), which are recognizable by LLMs and classic machine learning approaches. The second experiment is less successful, primarily due to two distinct reasons. Firstly, the estimation of dependencies in the domain of logistics is much more complicated, and classic methods are not a proper instrument for it. Secondly, there are possible



hallucinations of LLMs in their output. This phenomenon can be presented as insufficient data during the training process of LLMs and difficulty in generating numerous characteristics precisely.

Moreover, the study revealed that traditional models provide a considerable advantage in terms of cost optimization. The proposed approach is cheaper in  $1.7 \cdot 10^8$  times per 1000 tokens processing. Implementing these models requires significantly fewer computational resources compared to LLMs, which are often resource-intensive due to their complex architectures and large-scale data requirements. This aspect of cost-effectiveness is particularly crucial for organizations aiming to enhance their analytical processes without incurring prohibitive expenses. In conclusion, our research not only validates the practicality of combining LLMs with more cost-efficient and equally effective traditional machine learning models but also highlights the broader applicability and benefits of the proposed system approach. These findings encourage further exploration and adoption of classic machine learning techniques, promoting a more accessible, economical, and flexible analytical framework in various industries.

Furthermore, this study briefly touched upon the impact of various pre-processing techniques on the performance of LLMs compared to traditional natural language processing methods. While logistic regres-

sion offers simplicity and computational efficiency, it may not adequately capture complex relationships that more sophisticated models like random forests or neural networks could elucidate. The proposed system approach of a combination of LLMs and traditional ML models presents robust performance and results. Future research could also explore the integration of additional LLM platforms beyond the GPT-3.5-turbo and Mixtral-8x7B-Instruct-v0.1 used in this study, to assess their effectiveness across a broader range of applications and datasets. This would provide a more comprehensive understanding of how different LLMs perform in diverse analytical contexts.

**Author Contributions:** Volodymyr Savastiyarov: Conceptualization, Methodology, Resources, Writing – Review & Editing. Mykhailo Stoliar: Methodology, Software, Investigation, Data Curation, Writing – Original Draft. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research received no specific grant from any funding agency.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

**Data Availability:** The information supporting this research is readily accessible. <https://www.kaggle.com/datasets/tomatobuster/headline-news-data>

**Informed Consent:** There were no human subjects.

**Animal Subjects:** There were no animal subjects.

## References

- [1] Li et al., “Knowledge structure of technology licensing based on co-keywords network: A review and future directions” *International Review of Economics & Finance*, vol. 66, pp. 154–165, 2020. doi: 10.1016/j.iref.2019.11.007.
- [2] UNIDO, UNIDO Technology Foresight Manual, vol. 1. United Nations Industrial Development Organization, Vienna (2005).
- [3] European Commission. 2020. “Strategic Foresight Report – Charting the course towards a more resilient Europe”. Available online at: [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/new-push-european-democracy/strategic-foresight/2020-strategic-foresight-report\\_en](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/new-push-european-democracy/strategic-foresight/2020-strategic-foresight-report_en).
- [4] Shuohang Wang, Yang Liu, Yichong Xu, Chenguang Zhu and Michael Zeng, “Want To Reduce Labeling Cost? GPT-3 Can Help”, arXiv preprint arXiv.2108.13487, 2023, doi: 10.48550/arXiv.2108.13487.
- [5] P. Liu, W. Yuan, J. Fu, Z. Jiang, H. Hayashi, and G. Neubig, “Pretrain, prompt, and predict: A systematic survey of prompting methods in natural language processing”, *ACM Computing Surveys*, vol. 55, no. 9, pp. 1–35, 2023.
- [6] A. B. Rosa, N. Gudowsky, & P. Repo, “Repo Sensemaking and lens-shaping: Identifying citizen contributions to foresight through comparative topic modelling”, *Futures* 129, pp. 1–15, 2021, doi: 10.1016/j.futures.2021.102733.
- [7] M. Vignoli, J. Rurden, D. Wasserbacher and S Kimpeler, “An Exploration of the Potential of Machine Learning Tools for Media Analysis to Support Sense-Making Processes in Foresight”, *Frontiers in Communication* 7:750614, 2022. doi :10.3389/fcomm.2022.750614.
- [8] N. Pankratova, V. Savastiyarov, “Assessment of situations in the field of social disasters based on the methodology of foresight and textual analytics”. *Proceedings of the 2019 IEEE. Second International Conference IEEE UKRCON-2019*. pp. 1207–1210, ISBN 9781728138831.
- [9] Callie Y. Kim, Christine P. Lee and Bilge Mutlu, “Understanding Large-Language Model (LLM)-powered Human-Robot Interaction”, In *Proceedings of the 2024 ACM/IEEE, International Conference on Human-Robot Interaction (HRI '24)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 371–380, 2024, doi: 10.1145/3610977.3634966.
- [10] T. Brown, B. Mann, N. Ryder, M. Subbiah, J. D. Kaplan, P. Dhariwal, A. Neelakantan, P. Shyam, G. Sastry, A. Askell et al., “Language models are few-shot learners,” *Advances in neural information processing systems*, vol. 33, pp. 1877–1901, 2020.

- [11] B. Zhang and H. Soh, “Large Language Models as Zero-Shot Human Models for Human-Robot Interaction”, 2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Detroit, MI, USA, pp. 7961–7968, 2023, doi: 10.1109/IROS55552.2023.10341488.
- [12] F. Pourpanah et al., “A Review of Generalized Zero-Shot Learning Methods”, in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 45, no. 4, pp. 4051–4070, 1 April 2023, doi: 10.1109/TPAMI.2022.3191696.
- [13] C. Mühlroth and M. Grottke, “Artificial Intelligence in Innovation: How to Spot Emerging Trends and Technologies”, in *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 69, no. 2, pp. 493–510, April 2022, doi: 10.1109/TEM.2020.2989214.
- [14] M. Stoliar and V. Savastiyarov, “Using LLM classification in foresight studies”: Scientific Collection “InterConf”, vol. 157, pp. 367–375, 2023.
- [15] En Yu, Liang Zhao, Yana Wei, Jinrong Yang, Dongming Wu, Lingyu Kong, Haoran Wei, Tiancai Wang, Zheng Ge, Xiangyu Zhang and Wenbing Tao, “Merlin: Empowering Multimodal LLMs with Foresight Minds”, arXiv preprint arXiv:2312.00589, 2023, doi: 10.48550/arXiv.2312.00589.
- [16] Y. Luo, S. Xu and C. Xie, “E-commerce Big Data Classification and Mining Algorithm based on Artificial Intelligence”, 2022 IEEE 2nd International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI), Changchun, China, pp. 1153–1155, 2022, doi: 10.1109/ICETCI55101.2022.9832370.
- [17] Chan A., “GPT-3 and InstructGPT: technological dystopianism, utopianism, and “Contextual” perspectives in AI ethics and industry”, *AI Ethics* 3, pp. 53–64, 2023, doi: 10.1007/s43681-022-00148-6.
- [18] Dave Wild, “Futurework – A Guidebook for The Future of Work”, Aotearoa New Zealand: Smith & Wild. 218 p., 2023, ISBN 978-0-473-66594-4.
- [19] Mowafak Allaham and Nicholas Diakopoulos, “Supporting Anticipatory Governance using LLMs: Evaluating and Aligning Large Language Models with the News Media to Anticipate the Negative Impacts of AI”, arXiv preprint arXiv:2401.18028, 2024, doi: 10.48550/arXiv.2401.18028.
- [20] Cambria Erik, Bebo White., “Jumping NLP curves: A review of natural language processing research”, *IEEE Computational intelligence magazine* 9.2, pp. 48–57, 2014, doi: 10.1109/MCI.2014.2307227.
- [21] A. Jalilifard, V.F. Caridó, A.F. Mansano, R.S. Cristo, F.P.C. da Fonseca, “Semantic Sensitive TF-IDF to Determine Word Relevance in Documents”, Thampi, S.M., Gelenbe, E., Atiquzzaman, M., Chaudhary, V., Li, K.C. (eds) *Advances in Computing and Network Communications. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 736. Springer, Singapore, 2021, doi.org: 10.1007/978-981-33-6987-0\_27.
- [22] B. Ahmed, G. Ali, A. Hussain, A. Baseer and J. Ahmed, “Analysis of Text Feature Extractors using Deep Learning on Fake News”, *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 11, no. 2, pp. 7001–7005, Apr. 2021.
- [23] Lucky Agarwal, Kartik Thakral, Gaurav Bhatt, and Ankush Mittal, “Authorship Clustering using TF-IDF weighted Word-Embeddings”, In *Proceedings of the 11th Annual Meeting of the Forum for Information Retrieval Evaluation (FIRE '19)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 24–29, 2019, doi: 10.1145/3368567.3368572.
- [24] Fanghui Liu, Xiaolin Huang, and Jie Yang, “Indefinite Kernel Logistic Regression”, In *Proceedings of the 25th ACM International Conference on Multimedia (MM '17)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 846–853, 2017, doi: 10.1145/3123266.3123295.

Володимир Савастьянов, Михайло Столяр

#### СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО КОМБІНОВАНОГО ВИКОРИСТАННЯ ВЕЛИКИХ МОВНИХ ТА КЛАСИЧНИХ МОДЕЛЕЙ В ЗАДАЧАХ ПЕРЕДБАЧЕННЯ

**Проблематика.** Великі мовні моделі (LLMs) та пов'язані з ними агенти широко застосовують у різних сферах життя та є одними з технологічних проривів за останні роки. Ці найсучасніші моделі демонструють вражаючий потенціал, але в деяких ситуаціях вони демонструють неефективність. У цій статті досліджено виявлені обмеження у конкретних галузевих сферах і на прикладах задач передбачення.

**Мета дослідження.** У статті висвітлено можливості, які пропонують моделі на основі GPT, та зіставлено висновки із класичними методами аналізу текстових даних у задачах класифікації на прикладі методології передбачення. Метою дослідження є розроблення системного підходу до комбінованого використання традиційних підходів машинного навчання як практичної альтернативи LLMs у задачах передбачення (форсайту) на прикладі STEEP-аналізу, який дає можливість отримувати цінну інформацію із текстових даних.

**Методи.** Це дослідження структуроване на чотири сегменти: Data Mining, передобробка тексту з використанням LLMs, передобробка тексту за допомогою класичних методів обробки природної мови (NLP) та порівняльний аналіз результатів. Data Mining включає етапи збирання даних і попередньої обробки даних для навчальних і тестових спостережень. Для використання LLMs було застосовано підходи “chains of thought” та “prompt engineering”.

**Результати.** За результатами дослідження було встановлено, що LLMs можуть бути застосовані у комбінації із класичними методами машинного навчання для доменних специфічних сфер у STEEP-аналізі завданнях прогнозування. Результати показали, що запропонований підхід є значно швидшим і має меншу складність порівняно з LLMs, такими як GPT і Mistral. Збільшення кількості використаних моделей приводить до більш стабільних результатів.

**Висновки.** Основний результат роботи полягає в тому, що патерни, які виявляють LLMs за певних налаштувань, також можуть бути виявлені класичними моделями. Понад те збільшення кількості використаних LLMs на етапах обробки даних сприяє підвищенню стабільності результатів. Використання класичних моделей у комбінації з LLMs прискорить час відповіді та зменшить експлуатаційні витрати на запуск моделей.

**Ключові слова:** системний аналіз; методологія передбачення; текстова аналітика; класифікація; LLM; NLP.

Рекомендована Радою  
НН інституту прикладного системного аналізу  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
9 жовтня 2024 року

Прийнята до публікації  
19 листопада 2024 року

# МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI: 10.20535/kpissn.2024.1-4.314223

УДК 532.5, 533.6, 573.3

І.Г. Нестерук

Інститут гідромеханіки НАН України, Київ, Україна

Відповідальний автор: inesteruk@yahoo.com

## ПРИНЦИПИ ОПТИМІЗАЦІЇ ФОРМИ БЕЗПІЛОТНИХ АПАРАТІВ ВЕЛИКОЇ ДАЛЬНОСТІ

**Проблематика.** Оптимізація характеристик безпілотних апаратів вимагає вдосконалення їхньої форми для зменшення аеро- або гідродинамічного опору. Зокрема, апарати максимальної дальності повинні мати високу економічну ефективність, а саме великі значення відношення ваги до опору. Відповідні ідеї та формули опубліковані в цьому журналі ще декілька років тому. Разом з тим, великий інтерес до безпілотних апаратів вимагає короткого викладу основних принципів та ілюстрації на конкретних прикладах, які могли би бути доступними широкому колу інженерів і менеджерів.

**Мета дослідження.** Мета роботи – систематизувати власний доробок щодо методів збільшення комерційної ефективності застосування безвідривних тіл обертання і крил малого опору та окреслити сфери застосування для наземних, повітряних і водних апаратів великої дальності.

**Методика реалізації.** Використано отримані раніше аналітичні формули для комерційної ефективності з урахуванням аеродинамічного опору на корпусах та опору, пов'язаного з підтриманням ваги апаратів, для ламінарного і турбулентного режимів обтікання.

**Результати дослідження.** Отримано просте співвідношення для швидкості, об'єму та довжини корпуса оптимально апарата, що забезпечує ламінарний режим обтікання та максимальну дальність. Визначено діапазони чисел Фруда, в яких доцільно використовувати динамічну підтримку ваги. Розраховано характеристики оптимальних крил та відповідних літаків і планерів. Наведено приклад оптимального підводного апарата й запропоновано перспективну форму корпуса катера.

**Висновки.** Форму корпусів слід вибирати близькою до запропонованих раніше безвідривних тіл обертання, що можуть бути також розраховані відповідно до конкретних потреб. Слід дотримуватись запропонованого співвідношення між об'ємом і довжиною корпуса, швидкістю усталеного руху та кінематичною в'язкістю повітря або води. Оптимальні крила мають мати максимальне видовження та експлуатуватись на максимально допустимих кутах атаки. Великі значення економічної ефективності відкривають перспективи досягнення великої дальності навіть у разі застосування електричних двигунів, отримання дальності від 410 км до 850 км для літаків, 420–750 км для КАБів, що скидаються з висоти 10 км, 800–1200 км для підводних і надводних апаратів та фактично необмеженого перебування в повітрі дирижаблів, що живляться сонячною енергією.

**Ключові слова:** Безпілотні апарати; збільшення дальності; комерційна ефективність; безвідривні форми; зменшення опору.

### Вступ

Зростаючий інтерес до безпілотних апаратів вимагає вдосконалення форм їх корпусів для забезпечення максимальної ефективності. Деякі ідеї та формули опубліковані у статті [1]. Утім, реалії вимагають короткого викладу основних принципів та ілюстрації на конкретних прикладах, які могли би бути доступними широкому колу інженерів і менеджерів.

Сучасні технології відкривають нові горизонти для таких апаратів, дозволяючи як значно збільшити їх швидкість, так і значно збільшити або зменшити їх розміри. Наприклад, довжина сучасних танкерів може перевищувати 400 м, а повітряні дрони можуть мати розміри 45 мм (Nano Quad Copter from Revell [2]). Разом з тим, розробники та виробники зацікавлені у максимально простих і дешевих технологіях, які можна застосовувати без зниження ефективності апаратів.

**Пропозиція для цитування цієї статті:** І.Г. Нестерук, “Принципи оптимізації форми безпілотних апаратів великої дальності”, *Наукові вісті КПП*, № 1–4, с. 49–61, 2024. doi: 10.20535/kpissn.2024.1-4.314223

**Offer a citation for this article:** I. Nesteruk, “Shape optimization principles for long-range unmanned vehicles”, *KPI Science News*, no. 1–4, pp. 49–61, 2024. doi: 10.20535/kpissn.2024.1-4.314223

### Постановка задачі

У цьому дослідженні ми розглянемо основні принципи вдосконалення форми наземних, повітряних, надводних і підводних апаратів з метою збільшення їхньої економічної ефективності  $k$  – відношення ваги  $mg$  до опору  $X$ :

$$k = \frac{mg}{X}. \quad (1)$$

Максимальні значення  $k$  дозволяють апарату подолати максимальну кількість тонно-кілометрів за одиницю часу або досягти максимальної дальності за фіксованої кількості енергії на борту [1, 3].

**Метою дослідження** було систематизувати власний доробок щодо методів збільшення комерційної ефективності застосування безвідривних тіл обертання і крил малого опору та окреслити сфери застосування для наземних, повітряних і водних апаратів великої дальності.

Тим читачам, хто прагне одразу знайти конкретні рецепти створення нових конструкцій, ми пропонуємо пропустити наступний розділ та перейти одразу до потрібного типу апаратів: наземних, повітряних або водних.

### Методи дослідження

Якщо вага фіксована, то максимально ефективними будуть апарати з мінімальним опором, який для горизонтального усталеного руху можна поділити на дві частини:

$$X = X_U + X_W, \quad (2)$$

перша з яких,  $X_U$ , є опором рухові корпусу апарата у повітрі або воді, який суттєво залежить від швидкості  $U$ . Ми будемо використовувати також безрозмірні коефіцієнти опору, що ґрунтуються на об'ємі апарата  $V$ :

$$C_V = \frac{2X_U}{\rho U^2 V^{2/3}}, \quad (3)$$

або на деякій характерній площі  $A$ :

$$C_x = \frac{2X_U}{\rho U^2 A}. \quad (4)$$

Густину повітря або води позначатимемо як  $\rho$ .

Опір  $X_U$  суттєво залежить від форми корпусу, яка має зменшувати негативні ефекти відриву потоку. Оскільки активні методи запобігання

відриву (такі як відсмоктування/піддув примежового шару, нагрівання/охолодження поверхні, використання електромагнітних ефектів або періодичні зміни форми корпусів) потребують додаткових витрат енергії, ми сконцентруємось на пасивних методах, що дозволяють усунути відрив лише за рахунок відповідно вибраної форми корпусів. Можливості досягнення безвідривного режиму обтікання на твердих тілах обертання протягом понад 20 років вивчали в Інституті гідромеханіки НАН України [4]. Ці тіла виявились подібними до форми тіл деяких водних тварин [5–10], їх можна використовувати для зменшення опору в готовому вигляді або додатково розрахувати відповідно до потреб замовників.

Для об'ємних чисел Рейнольдса,

$$\text{Re}_V = \frac{UV^{1/3}}{\nu}, \quad (5)$$

де  $\nu$  – кінематична в'язкість води або повітря, з діапазону  $1000 < \text{Re}_V < \text{Re}_V^*$  та необмеженого потоку можна використовувати формулу [1, 7, 11]:

$$\text{Re}_V = \frac{4,7}{\sqrt{\text{Re}_V}}. \quad (6)$$

Рівняння (6) демонструє, що об'ємний коефіцієнт опору  $C_V$  осесиметричних безвідривних корпусів не залежить від їхньої форми за умови незмінності об'єму і є надійною оцінкою мінімально можливого опору для достатньо малих швидкостей або чисел Рейнольдса, які можна також розраховувати, спираючись на довжину корпусу  $L$ :

$$\text{Re}_L = \frac{UL}{\nu}. \quad (7)$$

Отриманий у [1] вираз для критичного числа Рейнольдса

$$\text{Re}_L^* = \frac{59558\pi L^3}{V} \quad (8)$$

дозволяє визначити значення швидкості  $U^*$ , перевищення яких забезпечує ламінарний режим обтікання:

$$U^* = \frac{59558\pi\nu L^2}{V}. \quad (9)$$

Відповідно, максимальний об'єм ламінарного корпусу



$$V^* = \frac{59558\pi v L^2}{U}. \quad (10)$$

Для дуже тонких тіл обертання ( $D/L < 0,05$ ;  $D$  – максимальний діаметр) коефіцієнт опору  $C_V$  може бути меншим за 0,001 для чисел Рейнольдса, близьких до критичних [1]. Для більших значень  $Re_V$  об'ємний коефіцієнт опору швидко зростає й наближається до величини

$$C_V \approx 0,01, \quad (11)$$

що фактично не залежить від видовження  $L/D$  [1].

Оскільки в ламінарному потоці  $C_V$  спадає зі збільшенням числа Рейнольдса (6), то для фіксованого об'єму мінімальних значень опору досягають за критичного значення числа Рейнольдса (8). Оскільки вага апарата зазвичай пропорційна об'єму його корпусу, то можна вважати, що максимальних значень ефективності також досягають за критичного значення числа Рейнольдса (8) або за значень швидкості та об'єму, що визначаються формулами (9) та (10).

Отже, оптимальні параметри корпусу та швидкості бажано обирати з урахуванням умови

$$\frac{UV}{L^2} = 1,81 \cdot 10^5 v. \quad (12)$$

Можливості досягнення таких значень проілюструємо випадком дельфіна з об'ємом 0,091 м<sup>3</sup> та довжиною 1,83 м (саме такі значення використано у знаменитій статті Грея [12]). Умова (12) виконується для швидкості 8,9 м/с у воді з температурою 15 °С. Аналогічні оцінки можна зробити і для риби-вітрильника (*Istiophorus platypterus*), яку вважають однією із найбільш швидких водних тварин [13–15]. Беручи найбільшу зареєстровану довжину цієї риби 3,15 м за ваги 55,8 кг ( $V = 0,0558$  м<sup>3</sup>) [16] отримуємо, що умова (12) виконується на швидкості 41,8 м/с.

Для великих та більш швидких апаратів умову (12) можна виконати за рахунок збільшення довжини корпусів, при цьому також збільшується видовження  $L/D$ . Відповідні формули для критичних значень довжини й об'єму ламінарних апаратів і приклади розрахунків для води та повітря можна знайти в [1]. Утім, через обмеження на довжину та видовження доводиться перевищувати критичне значення числа Рейнольдса (або значення у правій частині рівняння (12)), використовувати турбулентні кор-

пусу та оцінку опору (11). Відповідними прикладами є кити або підводні човни.

Під час розробки дуже малих і повільних апаратів (наприклад, підводних планерів [17]) також не вдається виконати умову (12). Тоді оптимальними будуть ламінарні безвідривні корпуси, опір яких визначають рівнянням (6), але для  $Re_V < 1000$  слід використовувати інші формули. Також наведені вище співвідношення не враховують ефекту стисливості повітря або води, що накладає додаткові обмеження на швидкість. Будемо вважати, що вона менша за 150 м/с (540 км/год). Швидкість руху у воді обмежується також кавітацією, що може виникати як на гвинтах, так і на корпусі. Оцінки критичної швидкості залежно від форми тіла обертання і глибини можна знайти у [7]. Для корпусів, що рухаються біля поверхні землі, наведені вище співвідношення (отримані для необмеженого потоку) потребують корекції. Для апаратів, що рухаються по поверхні води, слід враховувати також хвильовий опір [9, 18–21] та уточнити формули (6) і (8) (див. розд. 3.3 цієї статті).

Друга частина опору, а саме

$$X_w = \frac{mg(1-\alpha)}{k_w}, \quad (13)$$

$$\alpha = \frac{\rho V}{m}, \quad (14)$$

пов'язана з підтримкою ваги апарата  $mg$ . Коефіцієнт  $\alpha$  показує, яку частину ваги компенсовано силою Архімеда ( $\alpha = 1$  та  $X_w = 0$  для апаратів з нейтральною плавучістю, наприклад суден і дирижаблів). Коефіцієнт  $k_w$  можна вважати сталим. Наприклад, для літаків з підйнятною силою  $Y$  (що дорівнює вазі для горизонтального усталеного руху)

$$k_w = \frac{Y}{X_w} = \frac{C_y}{C_x}, \quad (15)$$

$$C_y = \frac{2Y}{\rho U^2 A}. \quad (16)$$

Отже, коефіцієнт  $k_w$  збігається з аеродинамічною якістю. Обернене значення  $1/k_w$  є коефіцієнтом тертя коліс для наземних апаратів. Ми не будемо розглядати конструкції, які бігають чи ходять (деякі оцінки ефективності бігу можна знайти в [1, 22]).

З формул (1), (2), (3), (13) та (14) впливає, що обернене значення ефективності

$$\frac{1}{k} = \frac{1-\alpha}{k_w} + \frac{C_v \rho U^2 V^{2/3}}{2mg} \quad (17)$$

буде мінімальним за максимального значення  $k_w$  та мінімальної швидкості руху. Якщо використати рівняння (6)–(11), то співвідношення (17) можна переписати у такому вигляді для ламінарного та турбулентного випадків відповідно:

$$\frac{1}{k_{lam}} = \frac{1-\alpha}{k_w} + 2,35\alpha \sqrt{\frac{vU^3}{g^2V}}, \quad \frac{3000v}{V^{1/3}} < U \leq \frac{59558\pi v L^2}{V}, \quad (18)$$

$$\frac{1}{k_{tur}} \approx \frac{1-\alpha}{k_w} + 0,005\alpha Fr_V^2, \quad \frac{59558\pi v L^2}{V} < U < 150 \text{ m/s}, \quad (19)$$

де об'ємне число Фруда визначають формулою

$$Fr_V = \frac{U}{g^{1/2} V^{1/6}}. \quad (20)$$

Оскільки мінімальний аеро- або гідродинамічний опір досягається за максимального об'єму ламінарного корпусу  $V^*$ , то найбільше значення економічної ефективності  $k^*$  можна отримати з використанням формул (10) та (18):

$$1/k^* = (1-\alpha)/k_w + 0,00543\alpha Fr_L^2, \quad (21)$$

$$Fr_L = \frac{U}{\sqrt{gL}}. \quad (22)$$

Рівняння (21) свідчить, що максимальне значення ефективності не залежить від форми безвідривних корпусів, що задовольняють умову (12), та визначається лише числом Фруда (22).

Якщо зафіксувати швидкість та об'єм апарата, то з (18) та (19) випливає, що максимальної комерційної ефективності (мінімального значення  $1/k$ ) досягають або за мінімально малого, або за максимально великого значення  $\alpha$  залежно від значення коефіцієнта  $k_w$ . Критичні значення цього коефіцієнта можна отримати з рівнянь (18) та (19) [1]:

$$k_{w,lam}^{**} = 0,43 \sqrt{\frac{g^2 V}{v U^3}}, \quad \frac{3000v}{V^{1/3}} < U \leq \frac{59558\pi v L^2}{V}, \quad (23)$$

$$k_{w,tur}^{**} \approx 200 Fr_V^{-2}, \quad \frac{59558\pi v L^2}{V} < U < 150 \text{ m/s} \quad (24)$$

для ламінарного та турбулентного потоків відповідно. Якщо виконується умова (12), то з (21) або (23) випливає

$$k_w^{**} = 184 Fr_L^{-2}. \quad (25)$$

Якщо  $k_w < k_w^{**}$ , максимальної комерційної ефективності досягають за максимально великого значення  $\alpha$ , інакше параметр  $\alpha$  має бути максимально малим.

Для апаратів з нейтральною плавучістю ( $\alpha = 1$ ) аеро- чи гідродинамічний опір корпуса слід враховувати завжди, оскільки для них  $X_w = 0$ . В інших випадках з умови  $X_U = X_w$  можна оцінити критичні значення швидкості  $U^{**}$ , у разі перевищення яких слід враховувати аеро- чи гідродинамічний опір ламінарного та турбулентного корпусів відповідно:

$$U_{lam}^{**} = 0,573 \sqrt[3]{\frac{(1-\alpha)^2 mg^2}{k_w^2 \alpha \rho v}} = 0,573 \sqrt[3]{\frac{(1-\alpha)^2 V g^2}{k_w^2 \alpha^2 v}}, \quad \frac{3000v}{V^{1/3}} < U^{**} \leq \frac{59558\pi v L^2}{V}, \quad (26)$$

$$U_{tur}^{**} = 14,1 \sqrt{\frac{g(1-\alpha)}{k_w} \frac{m^{1/6}}{\alpha^{1/3} \rho^{1/6}}} = 14,1 V^{1/6} \sqrt{\frac{g(1-\alpha)}{\alpha k_w}}, \quad \frac{59558\pi v L^2}{V} < U^{**} < 150 \text{ m/s}. \quad (27)$$

Для оптимальних ламінарних корпусів умова (12) та формула (26) дозволяють отримати:

$$U^{**} = 13,6 \sqrt{\frac{(1-\alpha)gL}{k_w \alpha}}. \quad (28)$$

Знаючи комерційну ефективність  $k$ , можна досить легко оцінити дальність руху  $S$  із запасом енергії на борту  $Q$ , що дозволяє підтримувати сталу потужність двигуна  $XU p_1$  протягом часу  $T$ . Коефіцієнт  $p_1 > 1$  показує, що лише частина запасу енергії використовується для подолання опору  $X$  з механічною потужністю  $UX$ . Його значення залежить від ефективності двигуна, витрат енергії на стабілізацію та керування рухом, роботу приладів тощо. Тоді для дальності отримуємо:

$$S = UT = U \frac{Q}{XU p_1} = \frac{Q}{X p_1} = \frac{Qk}{p_1 mg}. \quad (29)$$

Якщо використати запас енергії на одиницю ваги  $q$  та врахувати, що вага двигуна та палива (або електричних батарей) становлять лише частину загальної ваги апарата  $p_2mg$ ;  $p_2 < 1$ , то рівняння (29) набуває вигляду

$$S = \frac{kqp_2}{p_1}. \quad (30)$$

Формула (30) свідчить, що дальність лінійно зростає зі збільшенням комерційної ефективності.

Оцінимо дальність електричних апаратів  $S_e$ , використовуючи факт, що сучасні електричні батареї можуть забезпечувати запас енергії приблизно 1000 кілоджоулів на кілограм ваги [23]. Тоді  $q$  буде дорівнювати приблизно  $10^5 J/N = 10^5 \text{ м} = 100 \text{ км}$ . Беручи, наприклад, значення  $p_1 = 5$  та  $p_2 = 0,5$ , із (30) отримуємо:

$$S_e \sim 10k \text{ (km)}. \quad (31)$$

Слід зазначити, що використання бензину або дизельного палива забезпечує приблизно у 40 разів більший запас енергії на одиницю ваги, що дозволяє суттєво збільшити дальність або вивільнити більше місця для корисного навантаження (зменшити значення  $p_2$ ).

Далі розглянемо можливості збільшення економічної ефективності та, відповідно, дальності апаратів, що рухаються по поверхні землі, у повітрі, над та під водою. Через значний інтерес саме до не дуже великих апаратів ми приділимо особливу увагу оптимальним корпусам малого опору, що дозволяють рухатись у ламінарному безвідривному режимі (форму яких досліджували в [1, 4–10]) та оптимальним крилам відповідних літаків.

## 1. Наземні апарати

Спочатку розглянемо можливості апаратів малого опору з осесиметричними ламінарними безвідривними корпусами, що задовольняють умову (12). Якщо використати значення кінематичної в'язкості повітря  $\nu \approx 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 / \text{с}$ , що відповідає стандартній атмосфері на нульовій висоті над рівнем моря [24], то вона набуває вигляду

$$\frac{UV}{L^2} = 2,7 \text{ м}^2 / \text{с}. \quad (32)$$

Для апарата зі швидкістю  $U = 30 \text{ м/с}$  та з довжиною  $L = 5 \text{ м}$  об'єм його корпусу має становити  $2,25 \text{ м}^3$ . Тоді формули (21) та (25) дають

критичне значення  $k_w^{**} \approx 10$ . Порівняємо його з характерними значеннями  $k_w$  (13). Коефіцієнт тертя на колесах  $1/k_w$  залежить від їх конструкції та якості дорожнього покриття. Для сучасних автомобілів вдалося отримати значення від 0,007 до 0,014 [25], а для велосипедів – від 0,0025 до 0,005 [26]. Отже,  $k_w > 70 \gg k_w^{**}$ , тому оптимальними будуть апарати з мінімальними значеннями параметра  $\alpha$  (відповідно до (14) вагу слід збільшувати).

Визначимо, наскільки важливо покращувати аеродинамічні характеристики корпусів наземних апаратів. Відповідно до (28) для обраного значення довжини  $L = 5 \text{ м}$  та умови  $k_w = 143$  (максимальне значення наведено у [25]) отримуємо

$$U^{**} \approx 7,96 \sqrt{\frac{(1-\alpha)}{\alpha}} \text{ (m/s)}. \quad (33)$$

Оцінимо характерну швидкість  $U^{**}$ , у разі перевищення якої аеродинамічний опір переважає тертя на колесах для характерного значення коефіцієнта  $\alpha$ , що відповідає густині повітря  $\rho \approx 1,2 \text{ кг/м}^3$  (стандартна атмосфера на нульовій висоті над рівнем моря [24]). Середню густину корпусу будемо вважати близькою до густини води  $1000 \text{ кг/м}^3$ . Відповідно до (14) отримуємо  $\alpha = 0,0012$ . Тоді рівняння (33) дає значення приблизно  $230 \text{ м/с}$ . Ще більше значення  $U^{**}$  отримуємо для корпусів, виготовлених з більш важких матеріалів (менші значення  $\alpha$ ). Отже, аеродинамічним опором на апаратах з відносно великим об'ємом можна нехтувати навіть за досить малих значень опору тертя на колесах.

Отриманий висновок не означає, що форма корпусу може бути довільною, оскільки відрив потоку на невідповідних корпусах (для яких несправедливі наведені вище оцінки) може значно збільшувати аеродинамічний опір. Оскільки в умовах конкуренції навіть невелике зменшення опору дає переваги, то характеристики апарата бажано вибирати з дотриманням умови (32). Відповідні безвідривні форми корпусів можна знайти у [4–10], вони можуть бути розраховані також на замовлення. Правильна форма корпусу має особливе значення для малих апаратів (або тварин) [1, 22]. Показовими є дуже видовжені форми тіла ящірок (що мають масу лише 10–26 грамів, але розвивають швидкість 2–4 м/с [27]), подібні до ламінарних безвідривних тіл обертанья, розрахованих у [7]. Для цих тварин умова (32) не виконується (число Рейнольдса є меншим від

критичного значення (8)). Для подібних дуже малих апаратів економічну ефективність і критичні значення  $U^{**}$  та  $k_w^{**}$  слід розраховувати за допомогою формул (18), (23) і (26).

## 2. Повітряні апарати

Вагу апаратів, що рухаються у повітрі, можна підтримувати за допомогою крил (літаки, планери, керовані авіаційні бомби), великих гвинтів (гелікоптери, FPV-дрони) або сили Архімеда (дирижаблі). Розглянемо можливості збільшити їх економічну ефективність. Спершу розглянемо апарати малого опору з осесиметричними ламінарними безвідривними корпусами, що задовольняють умову (12) (або (32) для випадку руху на малих висотах). На більших висотах кінематична в'язкість повітря є набагато більшою ( $\nu \approx 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$  на висоті 10 км;  $\nu \approx 16 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$  на висоті 20 км [24]). Відповідно, збільшується значення у правій частині рівняння (32), а отже, граничні розміри або швидкості ламінарних корпусів малого опору (див. також [1]).

Щоб визначитись, який метод підтримання ваги є найбільш ефективним для збільшення дальності, перепишемо рівняння (25) у вигляді

$$Fr_L^{**} = \frac{13,6}{\sqrt{k_w}}, \quad (34)$$

де  $k_w$  – аеродинамічна якість апарата (15), а  $Fr_L^{**}$  – критичне значення числа Фруда (22). Якщо  $Fr_L < Fr_L^{**}$ , максимальної комерційної ефективності досягають за максимально великого значення  $\alpha$  ((14), (21)), інакше параметр  $\alpha$  має бути максимально малим. Отже, дирижаблі ( $\alpha = 1$ ) стають ефективними за малих значень числа Фруда.

### 2.1. Гвинтокрили

Якщо використати характерне значення  $k_w = 4,5$  аеродинамічної якості (15) гвинтокрила [28], то з формули (34) отримуємо  $Fr_L^{**} = 6,4$ . Тоді для швидкості  $U = 15$  м/с критичне значення довжини корпусу FPV-дрона становить 0,56 м (згідно з (22)). Відповідно до (32) об'єм ефективного апарата, що рухається на малих висотах, не має перевищувати 0,06 м<sup>3</sup>. Розміри більш швидкісних оптимальних апаратів є більшими. Наприклад, для  $U = 30$  м/с максимальна довжина збільшується у 4 рази (відповідно до (22)), а об'єм – у 8 разів (відповідно до (32)).

Так само, як для наземних апаратів, опір на корпусі FPV-дрона в горизонтальному русі є набагато меншим, ніж опір, пов'язаний з підтриманням ваги. Формула (28) дає значення характерної швидкості  $U^{**}$  більші, ніж отримане вище значення 230 м/с. Тому розміри та вагу можна збільшувати без значного впливу на комерційну ефективність  $k$ , що буде приблизно дорівнювати  $k_w = 4,5$ . Такі маленькі значення  $k$  дуже обмежують дальність електричних FPV-дронів. Відповідно до формули (31) вона не перевищує 45 км навіть коли вага акумуляторів і двигунів становить половину ваги апарата. Для покращання ефективності найбільшу увагу слід приділяти характеристикам і розмірам гвинтів.

### 2.2. Літаки

Характерне значення аеродинамічної якості  $k_w$  літаків (15) є більшим, ніж у гелікоптерів [28]. Наприклад, для значення  $k_w = 20$  із формули (34) отримуємо  $Fr_L^{**} = 3$ . Отже, у діапазоні чисел Фруда  $3 \leq Fr_L^{**} \leq 6,4$  саме літаки є найбільш ефективними повітряними апаратами. Для більш високих чисел Фруда ефективними можуть бути також гелікоптери, а для менших – дирижаблі. Зробимо оцінювання для швидкості  $U = 50$  м/с, для якої критичне значення довжини корпусу оптимального літака (22) становить 28,3 м. Відповідно до (32) об'єм ефективного апарата, що рухається на малих висотах, не має перевищувати 43,2 м<sup>3</sup>. Для літаків, що використовують більші висоти, цей об'єм може бути значно більшим (наприклад, 101 м<sup>3</sup> для десятикілометрової висоти крейсерського польоту).

Так само, як для наземних апаратів, опір на корпусі оптимального літака в горизонтальному русі є набагато меншим, ніж опір, пов'язаний з підтриманням ваги. Наприклад, формула (28) дає значення характерної швидкості  $U^{**}$  приблизно 1800 м/с для значення коефіцієнта  $\alpha = 0,0012$ , що відповідає густині повітря  $\rho \approx 1,2 \text{ kg} / \text{m}^3$  (стандартна атмосфера на нульовій висоті над рівнем моря [24]) та середній густині корпусу, що дорівнює густині води 1000 кг/м<sup>3</sup>. На більших висотах або для більш важких корпусів значення  $U^{**}$  будуть ще більшими. Отже, переважна частина опору оптимальних літаків пов'язана з опором на крилах, що підтримують вагу.

Максимальне значення аеродинамічної якості крил (15) за турбулентного безвідривного режиму обтікання можна оцінити такою формулою [1]:



$$k_{W,\max,tur} \approx 3,58\lambda_W^{1/2} \text{Re}_H^{1/4}, \quad (35)$$

$$\lambda_W = b / H, \quad (36)$$

$$\text{Re}_H = \frac{UH}{\nu}, \quad (37)$$

де  $H$  – середня довжина хорди, використовується також для розрахунку числа Рейнольдса  $\text{Re}_H$ ;  $\lambda_W$  – видовження крила;  $b$  – розмах крила. Рівняння (35) враховує також індуктивний опір, пов'язаний зі сходом вихорів, та свідчить, що максимальне значення аеродинамічної якості та комерційної ефективності (оскільки  $k \approx k_W$ ) досягають за максимального видовження крила (36). Варто зазначити, що трикутна форма крила іранських дронів «Shahed-136» [29] з видовженням приблизно 2 не виглядає оптимальною, оскільки максимальне можливе значення якості за формулою (35) становить приблизно 15,1.

Видовження крил обмежується міркуваннями міцності конструкції та необхідністю підтримувати вагу на достатньо малих кутах атаки, що запобігають відриву потоку. Для оцінювання можна використовувати отримані в [1] вирази для оптимального кута атаки

$$\beta_{opt,tur} \approx 0,07\lambda_W^{1/2} \text{Re}_H^{-1/4} \quad (38)$$

та максимальної підйімальної сили на ньому в умовах безвідривного турбулентного обтікання:

$$\begin{aligned} Y_{opt,tur} &\approx 0,22\lambda_W^{3/2} \text{Re}_H^{27/4} \rho v^2 = \\ &= 0,22\rho b^{3/2} U^{27/4} H^{3/4} \nu^{1/4}. \end{aligned} \quad (39)$$

Оскільки для запобігання відриву потоку кути атаки крил обмежені деяким значенням  $\beta_m$ , рівняння (38) накладає обмеження на значення видовження:

$$\lambda_W \approx 204\beta_m^2 \text{Re}_H^{1/7}, \quad (40)$$

а (35), відповідно, на аеродинамічну якість:

$$k_{W,\max,tur} \approx 51,1\beta_m \text{Re}_H^{1/7}. \quad (41)$$

Вважатимемо, що максимальний кут атаки  $\beta_m$  дорівнює 0,15 радіан (або 8,59 градусів; наприклад, для профілю NACA-4412 відрив відбувається на кутах атаки, більших за 11 градусів для числа Рейнольдса 150 тисяч, та 15 градусів для числа Рейнольдса 3 мільйони [29]).

Результати розрахунків за формулами (39)–(41) для літака з різними значеннями довжини хорди крила  $H$ , що летить на малих висотах ( $\rho \approx 1,2 \text{ kg/m}^3$ ,  $\nu \approx 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  [24]) зі швидкістю  $U = 100 \text{ м/с}$ , наведено в табл. 1. Видно, що оптимальні крила можуть підтримувати вагу дуже різних апаратів з вагою від 40 кГ до 258 т (яка дорівнює піднімальній силі (39) в усталеному горизонтальному польоті). Видовження та економічна ефективність зростають зі збільшенням середньої довжини хорди крила (табл. 1). Досить великі значення аеродинамічної якості  $k_W$  (що є близькою до комерційної ефективності  $k$ ) дозволяють отримати значну дальність навіть для електричних літаків. Відповідно до значень, наведених у табл. 1, та формули (31) можна сподіватись досягти дальності від 410 км до 850 км.

Таблиця 1. Характеристики оптимальних крил для різних значень середньої довжини хорди

Середня довжина хорди крила, $H$ (м)	Число Рейнольдса, $\text{Re}_H \cdot 10^6$ , (37)	Видовження крила $\lambda_W = b / H$ , рівн. (40) для $\beta_m = 0,15$	Аеродинамічна якість $k_W = \frac{Y}{X} = \frac{C_y}{C_x}$ , рівн. (41)	Розмах оптимального крила $b = \lambda_W H$ (м)	Піднімальна сила $Y_{opt,tur}$ (Н), рівн. (39)
0,02	0,13	24,8	41,4	0,50	56,1
0,05	0,33	28,2	47,2	1,41	399,5
0,1	0,67	31,2	52,1	3,12	1764,2
0,2	1,33	34,4	57,5	6,89	7791,7
0,5	3,33	39,2	65,6	19,6	55 509
1,0	6,67	43,3	72,4	43,3	245 148
2,0	13,3	47,8	79,9	95,7	1 082 660
3,0	20,0	50,7	84,7	152	2 581 252



Для більших висот польоту з фіксованою швидкістю числа Рейнольдса зменшуються (через збільшення кінематичної в'язкості повітря, див (37)), тому для фіксованого значення максимального кута атаки  $\beta_m$  видовження оптимального крила та його аеродинамічна якість також зменшуються ((40) та (41)). Через спадання густини повітря на більших висотах [24] меншою стає також піднімальна сила, яку за допомогою (39) та (40) можна записати у вигляді

$$\begin{aligned} Y_{opt,tur} &\approx 641\beta_m^3 \operatorname{Re}_H^{15/7} \rho v^2 \approx \\ &\approx 641\beta_m^3 U^{15/7} H^{15/7} \rho v^{-1/7}. \end{aligned} \quad (42)$$

Щоб підтримувати вагу на більших висотах, літак має збільшувати швидкість.

Для зручності розробників характеристики оптимального крила та вага відповідних літаків (що дорівнює підймальній силі (39) або (42) в усталеному горизонтальному польоті) подано на рис 1–3 для різних розмірів хорди. Окремо зображено випадки маленьких, середніх і великих літаків, що рухаються на малих висотах зі швидкістю 100 м/с.

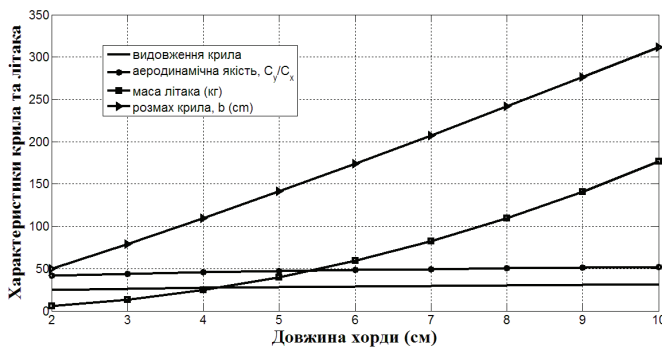


Рис. 1. Характеристики оптимального крила та вага малих літаків, що летять на малих висотах зі швидкістю 100 м/с, для різних значень середньої довжини хорди  $H$

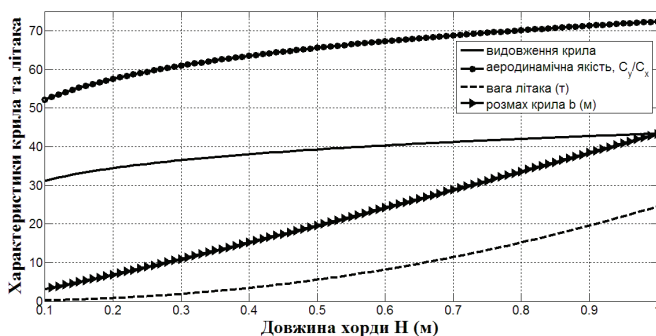


Рис. 2. Характеристики оптимального крила та вага літаків середніх розмірів, що летять на малих висотах зі швидкістю 100 м/с, для різних значень середньої довжини хорди  $H$

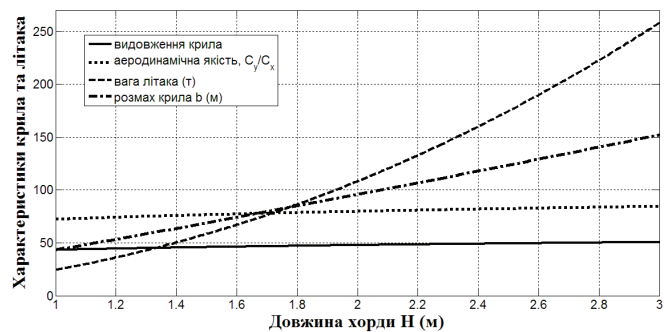


Рис. 3. Характеристики оптимального крила та вага великих літаків, що летять на малих висотах зі швидкістю 100 м/с, для різних значень середньої довжини хорди  $H$

Для великих і швидких літаків неможливо виконати умову (12), тому навіть безвідривні фіюзеляжі будуть обтікати у турбулентному режимі, для якого слід використовувати формули (19), (24) та (27). Зокрема, якщо об'єм фіюзеляжу  $100 \text{ м}^3$  за  $\alpha = 0,0012$  та  $k_w = 85$ , опір на ньому стає суттєвим лише на швидкостях, більших за 298 м/с, тому крило робить основний внесок в опір навіть дуже великих літаків, а  $k \approx k_w$ .

### 2.3. Планери, керовані авіаційні бомби (КАБ)

Так само, як для літаків, економічна ефективність планерів або КАБів визначається аеродинамічною якістю крила ( $k \approx k_w$ ), тому залишаються в силі всі висновки попереднього розділу. Зауважимо, – з рівнянь (40) і (41) випливає, що аеродинамічна якість залежить лише від видовження крила та максимального значення кута атаки  $\beta_m$  (для будь-якого числа Рейнольдса), оскільки з них легко отримати

$$k_{w,max,tur} \approx 0,251 \frac{\lambda_w}{\beta_m}. \quad (43)$$

Залежність (43) для  $\beta_m = 0,15$  показано на рис. 4.

Для фіксованих значень  $\beta_m$  та  $\lambda_w$  рівняння (40) дозволяє визначити відповідне число Рейнольдса, а формула (42) – знайти відповідну піднімальну силу, що приблизно дорівнює вазі планера під час його руху у спокійній атмосфері під малим кутом до горизонту  $\gamma$ . Відповідну масу в кілограмах показано маркерами на рис. 4 (більші розміри маркерів відповідають більшій висоті польоту).

Знаючи число Рейнольдса, можна з (37) легко визначити швидкості, потрібні для підтримання ваги апарата для різних величин середньої хорди крила  $H$ . Відповідні криві

зображені на рис. 4 точковими (для висоти польоту 10 км) та пунктирними (для польоту біля поверхні землі) кривими. Товщина цих ліній зростає зі збільшенням хорди крила:  $H = 0,1$  м;  $H = 0,3$  м та  $H = 0,6$  м відповідно. Оскільки наведені вище співвідношення не враховують стисливість повітря, показані лише значення швидкості, менші ніж 150 м/с.

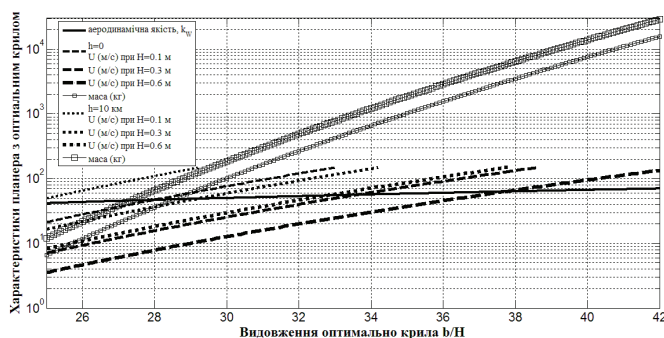


Рис. 4. Характеристики планера або КАБа для різних значень видовження оптимального крила  $b/H$

Наведені криві дозволяють оцінити розміри потрібних крил і швидкість запускання планерів або скидання КАБів. За потреби характеристики можна уточнити, використовуючи рівняння (40)–(43). Для планування у спокійній атмосфері дальність руху вздовж поверхні землі

$$S = h \operatorname{tg} \gamma = h \frac{Y}{X} \approx h \frac{Y}{X_w} = h k_w. \quad (44)$$

Великі значення аеродинамічної якості дозволяють досягти дальності 420–750 км для КАБів з оптимальними крилами, що скидаються з висоти 10 км, якщо використати енергію висхідних потоків, то дальність можна суттєво збільшити. Варто зауважити, що дальність оптимальних апаратів майже не залежить від їх швидкості, розмірів та ваги.

Слід зазначити, що видовження крил, наведені в табл. 1 та на рис. 1, не є недосяжними. Наприклад, фірма Eta випускає планер з видовженням крила 51,33, який демонструє аеродинамічну якість 70 на швидкості 30 м/с [31]. Для середньої довжини хорди цього планера 0,602 м/с отримуємо за (37) значення числа Рейнольдса 1,2 мільйона для руху поблизу поверхні землі, а за формулою (35) значення аеродинамічної якості 69,7, дуже близьке до отриманого на реальному планері.

Фюзеляж такого планера має видовжену форму з відношенням  $L/D$  приблизно 9, подібну

до розрахованого у [7] безвідривного тіла обертання «Alvasoge». Через відсутність даних про об'єм фюзеляжу планера оцінимо його за допомогою формули [1]

$$V \approx \delta L^3 \left( \frac{D}{L} \right)^2 \quad (45)$$

з використанням величини параметра  $\delta = 0,28$ . Отримане значення  $3,2 \text{ м}^3$  дозволяє оцінити ліву частину умови (32) приблизно в  $1 \text{ м}^2/\text{с}$ , що значно менше правої частини. Отже, фюзеляж планера Eta може бути ламінарним, але докритичним. Знаючи його масу (850 кг), можна за формулою (14) оцінити коефіцієнт  $\alpha = 0,0045$ . Тоді рівняння (18) свідчить, що опір на фюзеляжі приблизно у 37 разів менший, ніж на крилі. Цей факт ще раз підтверджує висновок, що опором безвідривних корпусів апаратів, які рухаються в повітрі, найчастіше можна нехтувати порівняно з опором, пов'язаним з підтримкою ваги.

#### 2.4. Дирижаблі

Високі значення комерційної ефективності літаків і планерів, отримані вище, вимагають дещо переоцінити значення чисел Фруда, для яких доцільно використовувати дирижаблі. Підставляючи у (34) значення  $k_w = 85$ , отримуємо  $Fr_L^{**} = 1,48$ . Для менших значень числа Фруда більш ефективними будуть дирижаблі, при цьому максимально ефективними будуть апарати з найбільшим значенням коефіцієнта  $\alpha = 1$ . Для гібридних дирижаблів [32], що компенсують меншу силу Архімеда на великих висотах піднімальною силою на корпусі, комерційна ефективність буде меншою (відповідно до формул (18) та (19)). Виконаємо оцінювання для дирижабля завдовжки  $L = 50$  м, що рухається на висоті 20 км зі швидкістю  $U = 20$  м/с (цієї швидкості достатньо, щоб долати характерні вітри [33] й отримати апарат, що може зависати над однією точкою на поверхні землі). За формулою (22)  $Fr_L = 0,9$ , а для критичного об'єму  $V$  ламінарного корпусу за  $v \approx 16 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$  з (10) отримуємо  $3620 \text{ м}^3$ . Маса найбільш ефективного апарата становить 322 кг, оскільки густина повітря на висоті 20 км становить  $0,089 \text{ кг}/\text{м}^3$  дозволяє оцінити відповідну силу Архімеда. Рівняння (45) зі значенням  $\delta = 0,33$  (розрахованим у [5] для безвідривного тіла обертання з  $D/L = 0,3$ , подібного до форми тіла тунця [34]) дозволяє визначити максимальний діаметр відповідної осесиметричної оболонки дирижабля 14,8 м.

Значення економічної ефективності  $k$  такого дирижабля сягає 226 (відповідно до (21) за  $\alpha = 1$ ), а потужність горизонтального руху  $XU = (mgU/k) = 279$  Вт. Якщо вважати, що лише п'ята частина потужності використовується для подолання опору  $X$  (значення коефіцієнта  $p_1 = 5$ ), потрібно забезпечити приблизно 1,4 кВт. Це значення можна отримати за допомогою сонячних батарей. Наприклад, панель RSM156-6-430M із площею 2,17 м<sup>2</sup> та вагою 25,5 кг може забезпечити потужність 430 Вт [35]. Використання сонячної енергії дозволить використовувати запропонований оптимальний дирижабль фактично необмежений час.

### 3. Водні апарати

Через велику різницю у густині опір у воді є набагато більшим, ніж у повітрі, а менше значення кінематичної в'язкості значно зменшує критичні значення розмірів та швидкості оптимальних корпусів, що рухаються у воді. Наприклад, для  $\nu \approx 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$ , що відповідає температурі води 15 °С, рівняння (12) набуває вигляду

$$\frac{UV}{L^2} = 0,235 \text{ м}^2 / \text{с}. \quad (46)$$

Слід зазначити, що в'язкість досить суттєво зменшується зі зростанням температури (від  $\nu \approx 1,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$  за 0 °С до  $\nu \approx 0,66 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$  за 40 °С), тому рівняння (46) може потребувати корекції. Для апаратів, що рухаються по поверхні води, опором у повітрі можна знехтувати й використовувати для оцінювання водотонажності (об'єм корпусу нижче ватерлінії  $W$ ).

#### 3.1. Підводні човни

Для апаратів, що рухаються під поверхнею води на достатньо великій глибині, можна вважати, що  $\alpha = 1$ , та використовувати усі формули п. 2. Оцінімо за (46) критичні значення об'єму (водотоннажності) оптимального підводного апарата завдовжки 10 м, розрахованого на швидкість 15 м/с. Якщо водотоннажність становить 1,57 т, відповідний корпус має бути досить видовженим ( $L/D = 13,4$  за рівнянням (45) за  $\delta = 0,28$ ) і подібним до тіл обертання, розрахованих у [7–9].

За формулами (21) та (22) економічна ефективність такого апарата становить 80,2, а дальність з використанням електричних двигунів

може сягати 800 км (31). Якщо у підводному режимі апарат розігнати до швидкості 25 м/с і примусити його вийти з води під кутом 45°, то він зможе пролетіти у повітрі приблизно 64 м з максимальною висотою центра тяжіння над поверхнею води приблизно 16 м. Отже, апарат зможе долати деякі бонові загородження.

#### 3.2. Підводні планери

Підводні або морські планери [17, 36] є відносно невеликими й повільними підводними апаратами, що рухаються завдяки періодичним змінам плавучості (параметра  $\alpha$  (14)). Наприклад, планер SLOCUM має об'єм до 0,07 м<sup>3</sup>, довжину 1,5 м та швидкість приблизно 0,5 м/с [36]. Отже, для цих апаратів ліва частина рівняння (46) є набагато меншою, ніж права, тому як оптимальну форму корпусу можна вибирати будь-яке безвідривне тіло обертання з-поміж розрахованих у [4, 7–10] (оскільки об'ємний коефіцієнт опору (7) не залежить від форми). Корпус буде піддаватись обтіканню в ламінарному режимі, тому комерційну ефективність слід оцінювати за формулою (18), а рівняння (23) дає значення  $k_{W, lam}^{**} = 2765$  для планера SLOCUM за  $\alpha = 1$ , що набагато більше за аеродинамічну якість будь-якого крила.

Отже, максимальної комерційної ефективності підводних планерів досягають за максимально великого значення  $\alpha$ . Утім, параметр  $\alpha$  не може дорівнювати одиниці, оскільки тоді апарат не зможе рухатись (саме періодичні зміни плавучості, малі коливання значень  $\alpha$  поблизу одиниці змушують підводний планер рухатись вгору та вниз). Відповідний вибір видовженого крила, яке може бути також ламінарним [1], дозволяє отримати повністю ламінарний апарат із дуже високим значенням комерційної ефективності та дальності.

#### 3.3. Надводні апарати (катери)

У [9, 10] було запропоновано використовувати нижню половину спеціальних тіл обертання з гострим увігнутим носиком (подібних до форми тулуба найшвидших риб) як корпуси суден для зменшення хвильового та загального опору. Після відповідних експериментальних досліджень такі корпуси можна буде рекомендувати для безпілотних катерів.

Оцінімо очікувані значення економічної ефективності катера водотоннажністю 2 т

( $W = 2 \text{ м}^3$ ), що приблизно відповідає половині критичного об'єма (10) тіла обертання,

$$W \approx 0,5V^*, \quad (47)$$

та має приблизно вдвічі менший опір, ніж тіло обертання в необмеженому потоці. Тоді рівняння (46) можна переписати у вигляді

$$\frac{UW}{L^2} = 0,118 \text{ м}^2 / \text{с}, \quad (48)$$

а (18) та (23) таким чином:

$$\frac{1}{k_{lam}} = \frac{1 - \alpha}{k_w} + 1,66\alpha \sqrt{\frac{vU^3}{g^2W}}, \quad (49)$$

$$k_{w,lam}^{**} = 0,602 \sqrt{\frac{g^2W}{vU^3}}. \quad (50)$$

Для швидкості  $U = 15 \text{ м/с}$  та  $v \approx 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$  з рівняння (50) отримуємо  $k_{w,lam}^{**} = 126$ . За жодного глісування по верхні води не можна досягти таких значень аеродинамічної ефективності, отже  $k_w < k_w^{**}$ , а максимальної комерційної ефективності досягають за максимально великого значення  $\alpha$ . Таким чином, на катері із зазначеними характеристиками не вигідно використовувати динамічну підтримку ваги, а судно з нейтральною плавучістю  $\alpha = 1$  й довжиною  $L = 15,9 \text{ м}$  (відповідно до (48)) матиме комерційну ефективність 126 (відповідно до (49)), й може навіть з використанням електричного двигуна досягти дальності 1260 км (31), при цьому корпус має бути досить видовженим ( $L/D = 16,8$  відповідно до (45)) та може бути розрахований на замовлення.

## Висновки

Розглянуто принципи вибору оптимальних форм корпусів наземних, повітряних та водних апаратів для досягнення максимальної дальності. Наведено формули для економічної ефективності автомобілів, літаків, повітряних і морських планерів, КАБів, гвинтокрилів, дирижаблів, катерів і підводних човнів, показано приклади вибору оптимальних характеристик.

Форму корпусів слід вибирати близькою до запропонованих раніше безвідливних тіл обертання, що можуть бути також розраховані відповідно до конкретних потреб. Слід дотримуватись певного співвідношення між об'ємом та довжиною корпусу, швидкістю усталеного руху та кінематичною в'язкістю повітря або води. Тоді опором на корпусах автомобілів, літаків, планерів і FPV-дронів можна нехтувати, порівняно з опором, пов'язаним з підтримкою ваги.

Наведені прості формули свідчать, що оптимальні крила мають мати максимальне видовження та експлуатуватись на максимально допустимих кутах атаки. З використанням цих формул подано приклади розрахунків оптимальних характеристик літаків і планерів, а також приклад оптимального підводного апарата, запропоновано перспективну форму корпусу катера.

Великі значення економічної ефективності відкривають перспективи досягнення великої дальності навіть у разі застосування електричних двигунів, отримання дальності від 410 км до 850 км для літаків, 420–750 км для КАБів, що скидаються з висоти 10 км, 800–1200 км для підводних і надводних апаратів і фактично необмеженого перебування у повітрі дирижаблів, що живляться сонячною енергією.

## References

- [1] I. Nesteruk "Efficiency of Steady Motion and its Improvement with the Use of Unseparated and Supercavitating Flow Patterns" // *Naukovi Visti NTUU "KPI"*, no. 6, pp. 51–67, 2016. doi: 10.20535/1810-0546.2016.6.81605
- [2] <http://www.clubit.tv/2014/12/worlds-smallest-rc-drone-nano-quad-copter-2/>
- [3] Y. Gabrielly and Th. von Karman, "What Price Speed", *Mechanical Engineering*, USA, vol. 72, no. 10, pp. 775–779, 1950.
- [4] I. Nesteruk, "Rigid Bodies without Boundary-Layer Separation", *Int. J. of Fluid Mechanics Research*, vol. 41 (3), pp. 260–281, 2014.
- [5] I. Nesteruk, G. Passoni and A. Redaelli, "Shape of Aquatic Animals and Their Swimming Efficiency", *J. Marine Biology*, 2014. Article ID 470715, doi: 10.1155/2014/470715
- [6] I. Nesteruk, M. Brühl and Th. Müller. "Testing a special shaped body of revolution similar to dolphins trunk". *KPI Science News*, no. 2, pp. 44–52, 2018. doi: 10.20535/1810-0546.2018.2.129140
- [7] I. Nesteruk, "Maximal speed of underwater locomotion", *Innov Biosyst Bioeng*, vol. 3, no. 3, pp. 152–167, 2019. doi: 10.20535/ibb.2019.3.3.177976
- [8] I. Nesteruk. "Fastest Fish Shapes and Optimal Supercavitating and Hypersonic Bodies of Revolution". *Innov Biosyst Bioeng*, vol. 4, no. 4, pp. 169–178, 2020. doi: 10.20535/ibb.2020.4.4.215578
- [9] I. Nesteruk, "Shapes of the fastest fish and optimal underwater and floating hulls", *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2022. doi: 10.1016/j.taml.2022.100378



- [10] I. Nesteruk “Special Shaped Low Drag Bodies of Revolution Without Boundary-Layer Separation and Stagnation Points on the Noses”. Conference: Topical Problems of Fluid Mechanics 2024, Prague, February 21–23, 2024. doi: 10.14311/TPFM.2024.021
- [11] I. Nesteruk, “Reserves of the hydrodynamical drag reduction for axisymmetric bodies”, *Bulletin of Kiev University, Series: Physics & Mathematics*, no.1, pp. 112–118, 2002.
- [12] J. Gray, (1936), “Studies in animal locomotion VI. The propulsive powers of the dolphin”, *J. Exp. Biol.*, vol. 13, pp. 192–199.
- [13] Yu. G. Aleyev “Nekton” / Dr. W. Junk, The Hague, pp. 167–255, 1977.
- [14] <https://www.thetravelalmanac.com/lists/fish-speed.htm> [accessed 5th June 2023].
- [15] <https://www.jagranjosh.com/general-knowledge/fastest-fish-in-the-world-1556626683-1> [accessed 5th June 2023].
- [16] <https://www.fao.org/4/ac480e/ac480e05.pdf>
- [17] [https://en.wikipedia.org/wiki/Underwater\\_glider](https://en.wikipedia.org/wiki/Underwater_glider)
- [18] Larsson & Raven. “Ship resistance and flow. The principle of naval architecture”. 2010, SNAME.
- [19] T. H. Havelock. “Wave Patterns and Wave Resistance”. *Trans RINA*, (1934) pp. 430–442.
- [20] E.O. Tuck, J. L. Collins and W. H. Wells, “On Ship Waves and their Spectra”, *J Ship Res*, (1971), pp. 11–21.
- [21] I. Nesteruk, S. Krile, T. Müller, “Improved Low-Drag Pontoons for Water Bikes”. *J. Mar. Sci. Eng.*, no. 11, 1754 p., 2023. doi: 10.3390/jmse11091754
- [22] I. Nesteruk, “Tyrannosaurus Rex Running? Estimations of Efficiency, Speed and Acceleration”, *Innovative Biosystems and Bioengineering*, vol. 2, no. 1, pp. 42–48, 2018. doi: 10.20535/ibb.2018.2.1.120491
- [23] [https://en.wikipedia.org/wiki/Power-to-weight\\_ratio#Electrochemical\\_\(galvanic\)\\_and\\_electrostatic\\_cell\\_systems](https://en.wikipedia.org/wiki/Power-to-weight_ratio#Electrochemical_(galvanic)_and_electrostatic_cell_systems)
- [24] [https://www.engineeringtoolbox.com/international-standard-atmosphere-d\\_985.html](https://www.engineeringtoolbox.com/international-standard-atmosphere-d_985.html)
- [25] “Tires and Passenger Vehicle Fuel Economy: Informing Consumers, Improving Performance” – Special Report 286. National Academy of Sciences, Transportation Research Board, 2006 (PDF).
- [26] Willett, Kraig. “Roller Data”. [www.biketechreview.com](http://www.biketechreview.com). Retrieved 2017-08-05.
- [27] D. J. Irschick and B. C. Jayne, (1999) “Comparative three-dimensional kinematics of the hindlimb for high-speed bipedal and quadrupedal locomotion of lizards”. *J. Exp. Biol.*, no. 202, pp. 1047–1065. <http://onlinelibrary.wiley.com/resolve/reference/PMED?id=2051129>
- [28] [https://en.wikipedia.org/wiki/Lift-to-drag\\_ratio](https://en.wikipedia.org/wiki/Lift-to-drag_ratio)
- [29] [https://uk.wikipedia.org/wiki/Shahed\\_136](https://uk.wikipedia.org/wiki/Shahed_136)
- [30] <https://www.baylor.edu/content/services/document.php/41147.pdf>
- [31] [https://en.wikipedia.org/wiki/Eta\\_\(glider\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Eta_(glider))
- [32] <https://www.hybridairvehicles.com/airlander/airlander-10/>
- [33] “SMARTS Modeling of Solar Spectra at Stratospheric Altitude and Influence on Performance of Selected”, III–V Solar Cells (researchgate.net).
- [34] [https://en.wikipedia.org/wiki/Atlantic\\_bluefin\\_tuna](https://en.wikipedia.org/wiki/Atlantic_bluefin_tuna)
- [35] <https://sun-energy.com.ua/articles/skilky-vyroblyaye-sonyachna-panel>
- [36] <https://www.naval-technology.com/projects/slocum-underwater-glider/?cf-view>

I. Nesteruk

#### SHAPE OPTIMIZATION PRINCIPLES FOR LONG-RANGE UNMANNED VEHICLES

**Background.** Optimization of unmanned vehicles needs improvement of their shapes in order to reduce aero- or hydrodynamic drag. In particular, long-range vehicles must have high economical efficiency, i.e. large values of the drag-to-weight ratio. This journal had published corresponding ideas and formulae several years before. Nevertheless, high interest in unmanned vehicles needs a brief presentation of basic principles and illustrative examples, which can be available for wide groups of engineers and managers.

**Objective.** The purpose of the paper is to systematize the author’s contribution to the methods of the commercial efficiency improvement, unseparated bodies of revolution and wings of low drag and to discuss areas of applications for the long-range terrestrial, airborne and water vehicles.

**Methods.** Analytic formulae for the commercial efficiency (obtained before and taking into account the aerodynamic drag on hulls and the drag connected with the support of the vehicle weight) are used for the laminar and turbulent flow patterns.

**Results.** A simple relationship between the speed, volume and the hull length of the optimal vehicle providing the laminar flow and maximum range was obtained. Froude number ranges for the effective dynamic weight support were determined. Characteristics of optimal wings for corresponding airplanes and gliders were calculated. An example of the optimal underwater vehicle and a perspective boat hull shape are presented.

**Conclusions.** The hull shapes must be similar to the unseparated bodies of revolution, which were proposed before or can be calculated according to particular needs. The proposed relationship between volume and length of a hull, speed of steady motion and kinematic viscosity of air or water has to be used. The elongation and the angle of attack of optimal wings have to be as large as possible. High values of the commercial efficiency open prospects for achievement of long ranges even with the use of electrical engines, 410–850 km for



airplanes, 420–750 km for gliding bombs released at the attitude of 10 km, 800–1200 km for underwater and floating boats, and practically unlimited flight time for airships using solar energy.

**Keywords:** Unmanned vehicles; range increase; commercial efficiency; unseparated shapes; drag reduction.

Рекомендована Радою  
факультету прикладної математики  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
3 жовтня 2024 року

Прийнята до публікації  
29 жовтня 2024 року

## ПРИКЛАДНА МАТЕМАТИКА

DOI: 10.20535/kpissn.2024.1-4.312715

УДК 519.834:[316.77:32](045)

І.М. Терещенко\*, А.В. Миронець  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна  
\*Відповідальний автор: ivan78ter@gmail.com

### СПОСІБ ІНФОРМАЦІЙНОГО ВПЛИВУ НА ПОЛІТИЧНІ ВПОДОБАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ СТВОРЕННЯ МЕДІЙНИХ КОАЛІЦІЙ НА ОСНОВІ С-ЯДРА

**Проблематика.** Одним з важливих способів досягнення певних цілей у сучасному світі є широке використання кіберпростору та інформаційного впливу. Внаслідок високих темпів розвитку цифрових комунікацій відбувається їх серйозний вплив на численні сфери людської життєдіяльності, зокрема економічні, політичні процеси. Останнім часом інформаційний вплив, наприклад, у таких формах, як інформаційний вклад, загострення інфоприводів тощо, набуває критичного значення на політичні процеси всередині будь-якої країни, що може становити проблеми для безпеки держави.

**Мета дослідження.** Метою роботи є розробка способу створення коаліції серед інформаційних джерел для забезпечення впливу на певні групи суспільства з метою досягнення політичних цілей.

**Методика реалізації.** Для досягнення мети запропоновано використати просту гру як передумову створення коаліції; поділ прибутку, що ґрунтується на понятті С-ядра; арбітражного рішення Неша для розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації.

**Результати дослідження.** Розроблено модель впливу на політичні вподобання, в якому учасники, поділені на дві групи, мають виграти лише в тому випадку, коли об'єднуються в коаліцію, тобто кооперативна гра являє собою просту гру. До першої групи належать медіаджерела, діяльність яких охоплює незначну кількість людей. Друга група містить медійний ресурс іншого характеру. За допомогою ігрового підходу формалізовано багатокритеріальну задачу для знаходження максимальних результатів кожної з груп та знайдено її розв'язок.

**Висновки.** Розроблено модель для створення інформаційного впливу на політичні процеси за рахунок інтеграції визначених інформаційних джерел, що дає можливість на основі арбітражного рішення Неша вирішити задачу оптимального розподілу інформаційних ресурсів медійних джерел з невеликим рівнем впливу на суспільство.

**Ключові слова:** інформаційний вплив; коаліція; оптимальний розподіл ресурсів; С-ядро; кооперативна гра.

#### Вступ

Одним з важливих способів досягнення певних цілей у сучасному світі є широке використання кіберпростору та інформаційного впливу. Внаслідок високих темпів розвитку цифрових комунікацій відбувається їх серйозний вплив на численні сфери людської життєдіяльності, зокрема, економічні, політичні процеси [1, 2]. Останнім часом інформаційний вплив, наприклад, у таких формах, як інформаційний вклад, загострення інфоприводів тощо, набуває критичного значення на політичні процеси всередині будь-якої країни, що може становити проблеми для безпеки держави [3].

Очевидно, що як і будь-яка сфера життєдіяльності, функціонування політичних процесів передбачає використання певних ресурсів. Вони можуть мати різний характер, наприклад: фінансові, людські, комунікаційні тощо, проте їхньою основною спільною проблемою є обмеженість [4]. Незважаючи на те, що політичний процес вимагає іноді досить великої кількості ресурсів, у цій сфері діяльності здебільшого вдається непрямим способом використати результати інших учасників цього процесу, суттєво мінімізуючи власні витрати. Звідси виникає задача оптимального розподілу ресурсів з обов'язковим урахуванням специфіки певних аспектів політичної діяльності [4, 5].

**Пропозиція для цитування цієї статті:** І.М. Терещенко, А.В. Миронець, “Спосіб інформаційного впливу на політичні вподобання за допомогою створення медійних коаліцій на основі С-ядра”, *Наукові вісті КПІ*, № 1–4, с. 62–68, 2024. doi: 10.20535/kpissn.2024.1-4.312715

**Offer a citation for this article:** I.M. Tereshchenko, A.V. Myronets, “The method of informational influence on political preferences through the creation of media coalitions based on c-core”, *KPI Science News*, no. 1–4, pp. 62–68, 2024. doi: 10.20535/kpissn.2024.1-4.312715

Враховуючи важливість такої діяльності у суспільстві, як політичну, особливо в критичні моменти для держави, та необхідність її висвітлення, можна розглядати медійну сферу як привабливу галузь для інвестування з метою досягнення більшого інформаційного впливу. Слід зауважити, що з критеріїв ефективності інформаційного впливу є утримання певної аудиторії в своєму інформаційному полі. Таким чином, такий чинник, як людський фактор, призводить до конкуренції та конфліктів у політичній діяльності. Звідси навіть за умови оптимального розподілу ресурсів виникають досить великі ризики, що можуть бути спричинені можливим імовірнісним характером поведінки самих людей через вплив конкурентів, соціальні, економічні проблеми тощо. Зважаючи на це, логічно розглядати два способи вирішення проблеми ризиків. Перший полягає у знаходженні джерела збільшення своїх власних ресурсів, а другий пов'язаний з пошуком союзників, щоб заощадити свої ресурси та мати можливість їх більш раціонально використовувати. Вибираючи другий спосіб для розв'язування задачі, варто скористатися теорією ігор як одним із зручних інструментів для моделювання конкурентної боротьби [6, 7] з урахуванням перерахованих вище умов.

У статті запропоновано спосіб утримання політичних уподобань у певному інформаційному полі за рахунок кооперації, яка ґрунтується на використанні С-ядра. Розглянуто задачу оптимального розподілу ресурсів для організації інформаційного впливу за умови обмеженого обсягу фінансування.

### Постановка задачі

Розробити комплексний метод кооперації та координації діяльності інформаційних джерел для цілеспрямованого впливу на визначені соціальні групи з метою реалізації політичних завдань.

### Побудова перспективних інформаційних приводів

Медіапростір складається з різноманітних процесів, кожен з яких має свою актуальність, значущість, тривалість тощо. Будь-який учасник політичного процесу намагається просунути або використати наявну інформаційну повістку для досягнення своїх цілей. За умови різних можливостей щодо наявних ресурсів для продовження

політичної боротьби, те, що є оптимальним для великих відомих партій, може бути неоптимальним для дрібних партій, які мають невеликий обсяг фінансування.

Розглянемо представника політичного процесу з обмеженим обсягом коштів порівняно з іншими конкурентами. Для отримання голосів виборців вказаний представник інвестує в інформаційний ресурс, який має розповсюджувати його наративи. Зважаючи на обмеженість фінансування, необхідно вибирати інформаційні приводи, просування яких не призводить до великих витрат.

Звідси передусім треба проаналізувати поточний стан інформаційної повістки суспільства. Досліджуючи приводи, слід відібрати ті, на які варто звернути увагу з погляду можливості їх використання. Визначимо функцію з емпірично підібраними коефіцієнтами, яка буде визначати перспективність інформаційного приводу з деякою ймовірністю, у вигляді модифікованої сигмоїди:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-0,2(x-65)}}. \quad (1)$$

За допомогою такої функції пропонується поділити приводи на три групи. До першої групи входять ті, просування яких є необтяжливим, проте їхня значимість для суспільства є незначною. Третя група, навпаки, є повною протилежністю першої. Більш привабливими для інвестування з нашого погляду є інформаційні приводи другої групи, які мають середню вартість і приблизно ж такого рівня ймовірність у перспективі. ґрунтуючись на роботі [5] було побудовано ймовірнісну функцію для визначення перспективності інформаційних приводів.

### Створення коаліції

Після знаходження множини приводів відбувається формування коаліції за участі інформаційних джерел таким чином, щоб лише за наявності нашого джерела коаліція була вигральною. Інакше кажучи, розігрується проста гра, де наш гравець є ведучим. Проілюструємо це в табл. 1.

Таблиця 1. Вигляд вигральної коаліції

<i>A</i>	$a_1$	...	$a_n$	0
<i>B</i>	0	...	0	$b_j$

У табл. 1  $B$  – наш інформаційний ресурс;  $A$  – множина інших джерел. Тут  $a_j$ ,  $i = \overline{1, n}$  – кількість людей, які вибирають  $i$ -те джерело, причому  $a_i \cap a_j = 0$  за  $i \neq j$ . Ресурс  $B$  може бути певною медіафігурою, вплив якої визначається числовим значенням  $b_j$ ,  $j = \overline{1, m}$  таким чином. Під час взаємодії  $b_j$  і  $a_j$  кількість членів суспільства, що стають нашими спільними прихильниками, визначається як  $b_j \cap a_j$ .

З метою утримання всіх членів коаліції використовуємо такий поділ, як  $S$ -ядро. Нагадаємо, щоб поділ  $x$  кооперативної гри  $(I, v)$  належав її  $S$ -ядру, необхідно і достатньо, щоб для будь-якої коаліції  $S$  виконувалася рівність:  $x(S) \geq v(S)$ .

Множина  $A$  складається з  $n$  джерел, а множина  $B$  – з  $m$  ресурсів. Надалі наведемо приклад, де  $A = 6$ ,  $B = 4$ . Розглядатимемо усі можливі такі види коаліцій: 1) усі комбінації по два з  $A$  та  $b_1$ ; 2) усі комбінації по три з  $A$  та  $b_2$ ; 3) усі комбінації по чотири з  $A$  та  $b_3$ ; 4) усі комбінації по п'ять з  $A$  та  $b_4$ . Слід зазначити, що порядок розміщення елементів не має значення, тобто, наприклад,  $(a_1, a_2, b_1)$  та  $(a_2, a_1, b_1)$  – це одна й та сама коаліція. Після формування коаліцій для кожної з них розраховується поділ на основі  $S$ -ядра.

Далі позначимо результати на декартовій площині. По вертикальній осі  $u_2$  зазначаємо прибутки по всіх коаліціях для  $b_j$ ,  $j = \overline{1, m}$ . По горизонтальній осі  $u_1$  зазначаємо важливість кожної коаліції  $S$ , що обчислюється згідно з формулою

$$\frac{1}{\min_{i \in S} a_i} \sum_{i \in S} a_i.$$

Сенс важливості полягає в тому, що якщо кількість  $a_i$ , які входять до коаліції  $S$ , не дуже відрізняються від значення важливості, то можна зробити висновок, що в конкретному випадку значення  $a_i$  також не мають великих відмінностей одне від одного. В протилежному випадку одне чи декілька  $a_i$  значно менші за інші. Нашою метою є створення такої коаліції, де поруч з сильними гравцями є також слабкі.

Таким чином, треба знайти розв'язок задачі двокритеріальної оптимізації, де перший гравець намагається максимізувати значення важливості, а другий гравець – максимізувати свій поділ прибутку в певній коаліції. Застосуємо для розв'язання двокритеріальної задачі арбітражне рішення Неша. В результаті одержимо оптимальні значення важливості коаліції, поділ прибутку другого гравця у ній, а також, з якою частотою використовувати ті чи інші коаліції.

### Валідація способу

Маємо дві множини:  $B$  – наш інформаційний ресурс,  $A$  – множина шести інших джерел. Для елементів множини  $A$  потрібно проаналізувати поточний стан інформаційної повістки суспільства. Ця функція визначатиме перспективність кожного наявного інфоприводу з певною ймовірністю. Задамо цю функцію у вигляді модифікованої сигмоїди (рис. 1).

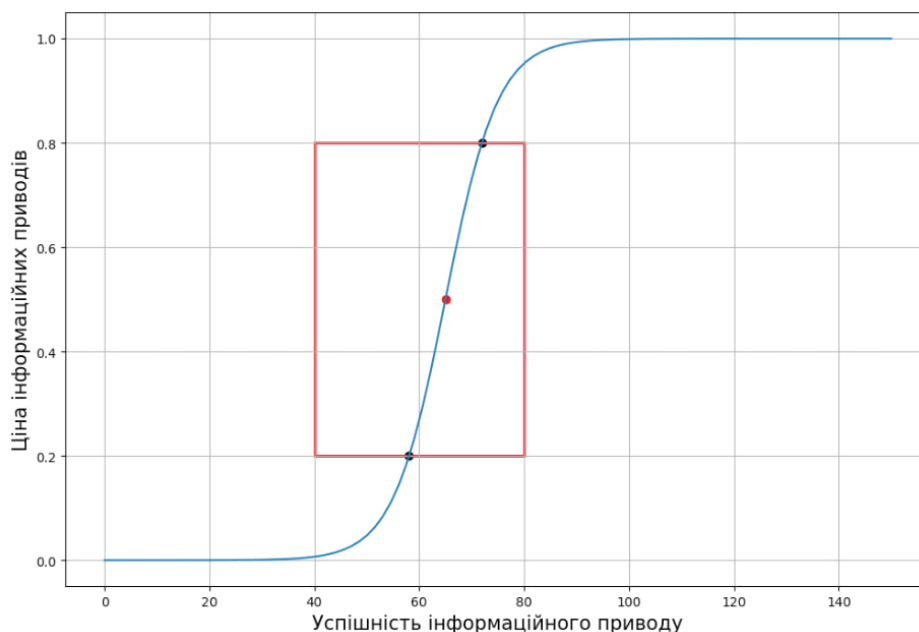


Рис. 1. Функція перспективності інфоприводів

Як результат, з використанням рівняння (1) маємо такі розмежування інформаційних приводів: до першої групи входять ті, просування яких є достатньо легким, однак і значущість для суспільства є незначною. Третя група – протилежна першій. Детально розглянемо інформаційні приводи другої групи, що перебувають в області прямокутника: вони є середніми за вартістю і приблизно ж такого рівня ймовірність у перспективі. Серед наявних інформаційних приводів з другої групи оберемо найбільш вдалий інфопривід за допомогою такої функції вибору, яку було використано в роботі [5]:

$$\pi(R, w_k, H(w_k)) = \left(\frac{R - w_k}{R}\right) \cdot (1 - 2|H(w_k) - 0,5|), \quad (2)$$

де  $\pi(R, w_k, H(w_k))$  – успішність  $k$ -го інформаційного приводу;  $R$  – загальна кількість ресурсів джерела;  $w_k$  – ціна  $k$ -го інформаційного приводу;  $H(w_k)$  – ймовірності успішності  $k$ -го інформаційного приводу.

Тоді проілюструємо такі результати для кожного джерела множини  $A$  окремо, які отримали за допомогою (2), оскільки кожен з них має різні інформаційні приводи з різними цінами, а також різну загальну кількість ресурсів (рис. 2–7).

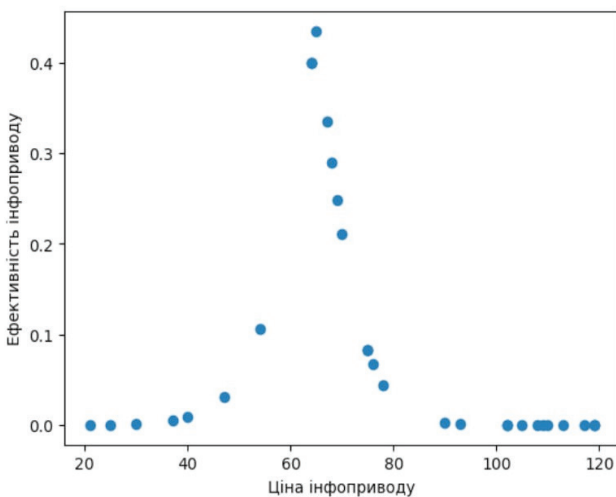


Рис. 2. Ефективність інформаційних приводів першого джерела

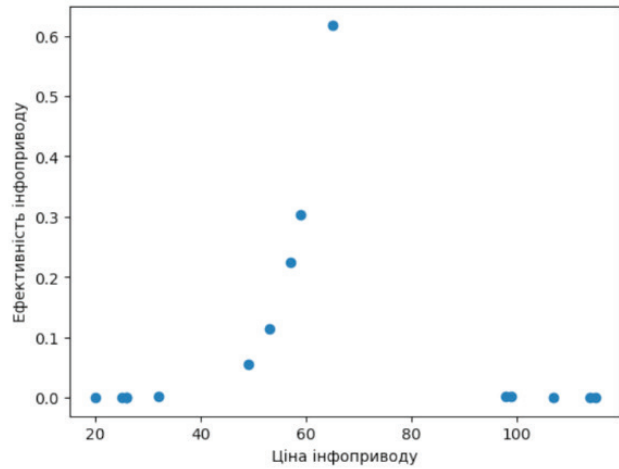


Рис. 3. Ефективність інформаційних приводів другого джерела

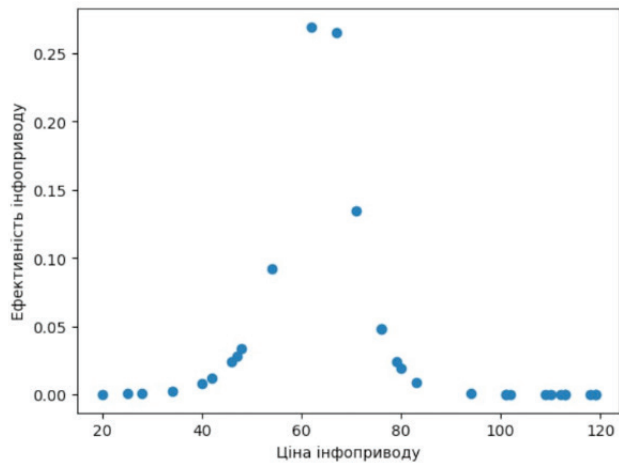


Рис. 4. Ефективність інформаційних приводів третього джерела

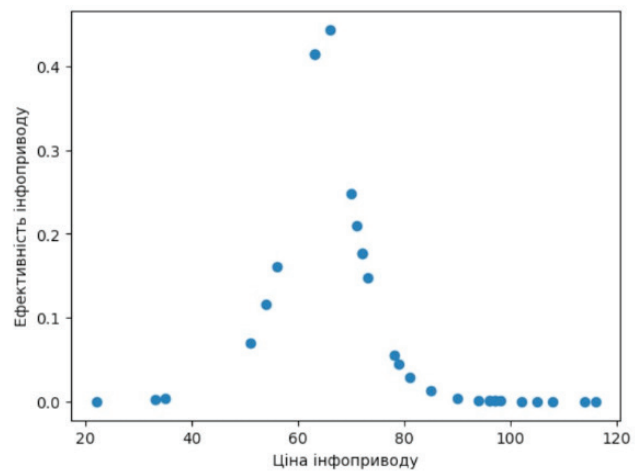


Рис. 5. Ефективність інформаційних приводів четвертого джерела



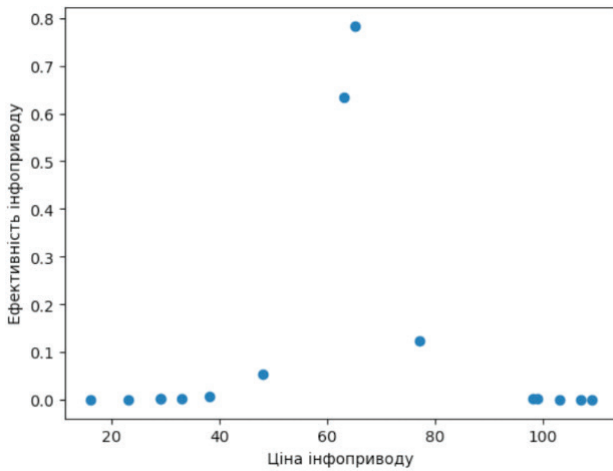


Рис. 6. Ефективність інформаційних приводів п'ятого джерела

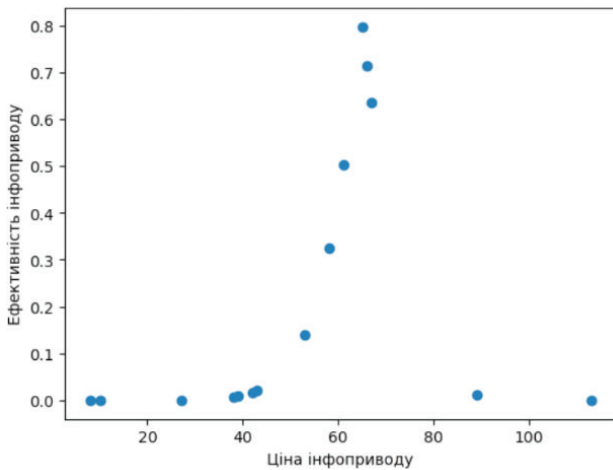


Рис. 7. Ефективність інформаційних приводів шостого джерела

Таким чином, ґрунтуючись на отриманих результатах вище, маємо: для першого джерела числове значення 500, для другого джерела – 590, для третього джерела – 270, для четвертого джерела – 690, для п'ятого джерела – 800, для шостого джерела – 860. Формуємо всі можливі коаліції, які будуть містити наш інформаційний ресурс з іншими джерелами. Крім цього, додатково потрібно накласти умову на максимальну кількість учасників, які можуть входити в одну коаліцію, оскільки занадто велика кількість не є достатньо ефективною. В цьому випадку максимальна кількість членів коаліції – 5: наш інформаційний ресурс  $b$  та 4 інших джерела. В такому разі маємо такі можливі коаліції:

1) наш ресурс, який для такого типу коаліцій дорівнює 1000, та 2 інших джерела:

$(a_1, a_2, b), (a_1, a_3, b), (a_1, a_4, b), (a_1, a_5, b), (a_1, a_6, b)$  тощо;

2) наш ресурс, який для такого типу коаліцій дорівнює 1700, та 3 інших джерела:  $(a_1, a_2, a_3, b), (a_1, a_2, a_4, b), (a_1, a_2, a_5, b), (a_1, a_2, a_6, b)$  тощо;

3) наш ресурс, який для такого типу коаліцій дорівнює 2500, та 4 інших джерела:  $(a_1, a_2, a_3, a_4, b), (a_1, a_2, a_3, a_5, b), (a_1, a_2, a_3, a_6, b)$ , тощо;

4) наш ресурс, який для такого типу коаліцій дорівнює 3000, та 5 інших джерел:  $(a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, b), (a_1, a_2, a_3, a_4, a_6, b)$  тощо.

Для кожної з отриманих коаліцій розрахуємо поділ на основі  $S$ -ядра.

У результаті пошуку  $S$ -ядра отримуємо результат, який зображено на рис. 8.

На рис. 8, наприклад (3, 4, 6) – це коаліція 4, 5, 6 джерел з множини  $A$ , та відповідно нашого інформаційного ресурсу.

Внаслідок цього отримуємо певну багатогранну множину, в якій виділяємо множину Парето-оптимальних вихідних результатів, інакше кажучи північно-східну межу, яка буде мати вигляд, який зображено на рис. 9.

Відповідно маємо такі дві матричні гри:

$$\Gamma_a = \begin{pmatrix} 6,88 & 3,41 & 2,08 & 2,18 \\ 11,56 & 11,19 & 3,96 & 11,89 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\Gamma_b = \begin{pmatrix} 1710 & 1292 & 660 & 90 \\ 450 & 830 & 70 & 810 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

У процесі розв'язку методом арбітражного рішення Неша обираємо дві крайні точки, а саме (1, 2, 4, 5, 6) та (1, 2, 3, 5, 6), що перебувають на північно-східній межі, й отримуємо таку систему рівнянь:

$$\begin{cases} u'_1 = 6.13 - \frac{u'_2}{204}, \\ u'_1 \cdot u'_2 = const \end{cases}$$

Тут  $u_1 = u'_1 + v_a$ ;  $u_2 = u'_2 + v_b$ , де  $v_a, v_b$  – відповідно ціни ігор у мішаних стратегіях для матричних ігор (3) та (4). Отримуємо такі розв'язки:

$$u_{1opt} = 4.57, \quad u_{2opt} = 319.$$

Таким чином, оптимальною важливістю коаліції буде 4,57, при цьому оптимальна кількість членів суспільства, що стають нашими прихильниками становить 319.

Для досягнення знайденого оптимуму необхідно використати коаліцію (1, 2, 4, 5, 6) з частотою 0,62, та коаліцію (1, 2, 3, 5, 6) з частотою 0,38.

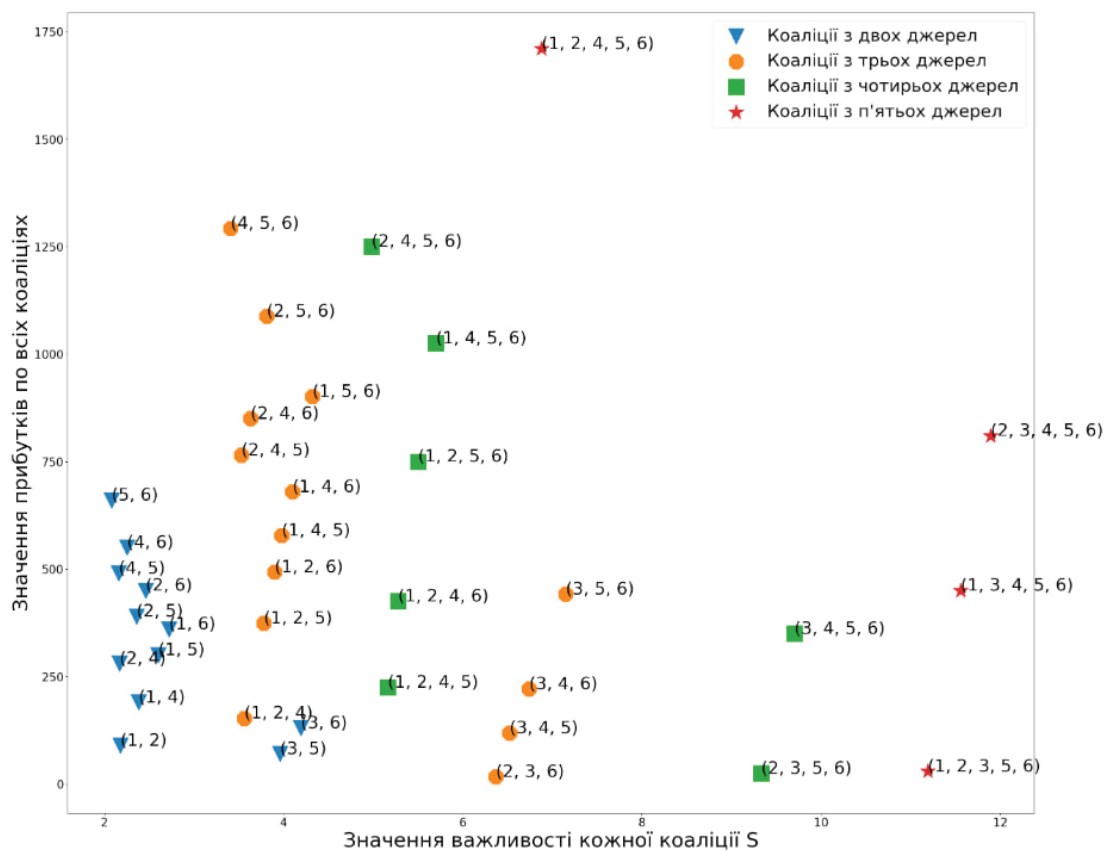


Рис. 8. Значення прибутків і значення важливості

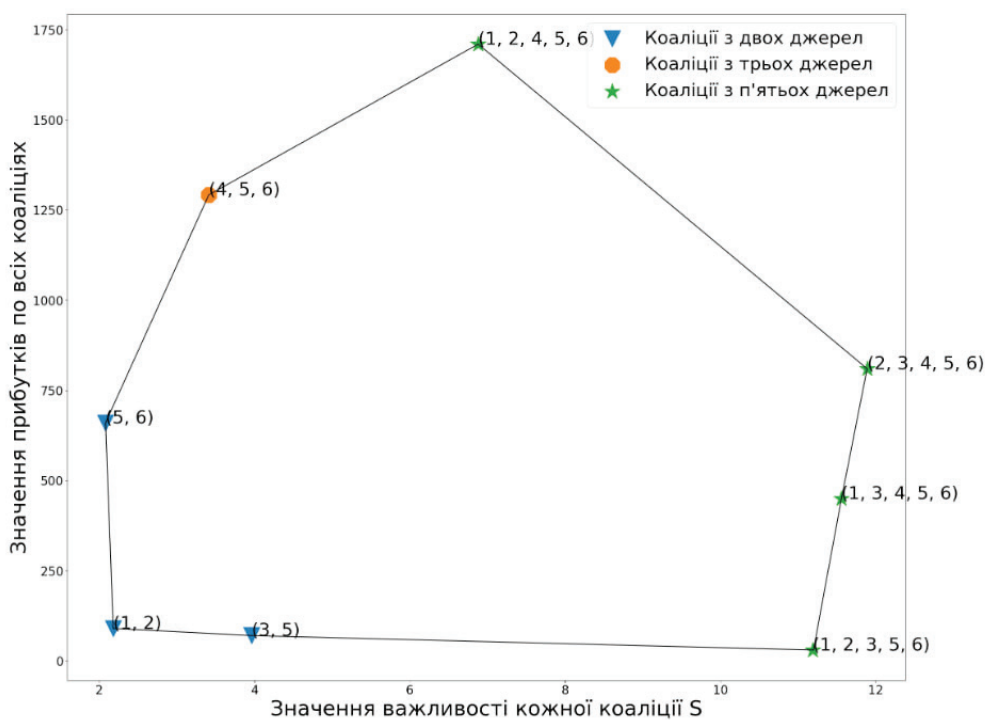


Рис. 9. Множина Парето-оптимальних вихідних результатів

## Висновки

У цій статті розроблено модель впливу на політичні вподобання суспільства, реалізація якого ґрунтується на побудові коаліції на множині інформаційних джерел, які мають відносно невеликий вплив на аудиторію. Для кожного джерела обчислено оптимальні інформаційні приводи, просування яких не потребує великих витрат і потенційно може принести досить непогані результати. Особливістю є те, що розглядаються лише прості кооперативні ігри, тому до уваги взято лише вигравні коаліції, причому один з учасників завжди є ведучим гравцем.

Стійкість коаліції було забезпечено використанням такого поділу, як C-ядро.

Проблему розподілу інформаційних ресурсів було зведено до задачі двокритеріальної оптимізації, де одним з критеріїв є кількісна характеристика впливу коаліції, а в якості другого критерію взято важливість коаліції. Для пошуку розв'язку цієї задачі було використано арбітражне рішення Неша.

Проведено комп'ютерний експеримент з розрахунку змодельованого процесу, який підтвердив, що запропонований ігровий підхід дає можливість практичного застосування для розв'язування реальних задач.

## References

- [1] Н.Ю. Горбенко, “Медіатизація та вплив ЗМІ на політичний порядок денний”, *Актуальні проблеми політики*, вип. 67, с. 53–60, 2021. doi: [HTTPS://DOI.ORG/10.32837/APP.V0167.1150](https://doi.org/10.32837/APP.V0167.1150).
- [2] N. Horbenko, “New media in the process of mediatization of political discourse”, *Visnyk of the Lviv University. Series Philos.-Political Studies*, vol. 42, pp. 205–211, 2022. doi: <https://doi.org/10.30970/PPS.2022.42.26>.
- [3] I. Tereshchenko, A. Myronets, “Counteracting destructive information influences based on the game approach”, *Theoretical and Applied Cybersecurity*, vol. 3, no. 1, pp. 38–41, 2021. doi: <https://doi.org/10.20535/tacs.2664-29132021.1.251305>.
- [4] С.К. Полумієнко, С.Є. Горда, “Кооперативна ресурсна модель збалансованого розвитку” *Математичне моделювання в економіці*, № 1–2(8), с. 62–73, 2017. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/131905>.
- [5] М.В. Миронець, “Пошук C-ядра у моделі виборчого процесу в умовах кооперації, побудованої на основі гри полковника Блотто” : магістерська дис. : 113 Прикладна математика, Київ, 77 с, 2022. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/51942>.
- [6] I. Heiets, T. Oleshko, O. Leshchinsky, “Game-Theoretic Principles of Decision Management Modeling Under the Competition”, *International Game Theory Review*, vol. 23, no. 1, 2050010, pp. 19, 2021. <https://doi.org/10.1142/S0219198920500103>.
- [7] Siddhartha Bandyopadhyay, Mandar Oak, “Party Formation and Coalitional Bargaining in a Model of Proportional Representation”, *Games*, 13(4), pp. 48, 2022. <https://doi.org/10.3390/g13040048>.

I.M. Tereshchenko, A.V. Myronets

## THE METHOD OF INFORMATIONAL INFLUENCE ON POLITICAL PREFERENCES THROUGH THE CREATION OF MEDIA COALITIONS BASED ON C-CORE

**Background.** One of the important ways to achieve certain goals in the modern world is the wide use of cyberspace and information influence. As a result of the high rate of development of digital communications, they have a serious impact on numerous spheres of human life, in particular, economic and political processes. Recently, information influence, for example, in such forms as information injection, sharpening of information drives, etc., is gaining critical importance on political processes inside any country, which can pose problems for the security of the state.

**Objective.** The purpose of the work is to develop a way to create a coalition among information sources to ensure influence on certain groups of society in order to achieve political goals.

**Methods.** To achieve the goal, it is proposed to use a simple game as a prerequisite for creating a coalition; profit sharing based on the C-core concept; of the Nash arbitrage decision for solving the multi-criteria optimization problem.

**Results.** A model of influence on political preferences has been developed, in which participants divided into two groups have gains only if they join a coalition, i.e., the cooperative game is a simple game. The first group includes media sources whose activities influence a small number of people. The second group contains a media resource of a different nature. With the help of a game approach, a multi-criteria problem was formalized with the selection of the maximum results of each of the groups and its solution was found.

**Conclusions.** A model has been developed for creating informational influence on political processes due to the integration of certain information sources, which makes it possible to solve the problem of optimal distribution of information resources of media sources with a small level of influence on society, based on the Nash arbitration decision.

**Keywords:** information influence; coalition; optimal allocation of resources; C-kernel; cooperative game.

Рекомендована Радою  
НН фізико-технічного інституту  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
28 січня 2024 року

Прийнята до публікації  
8 травня 2024 року

# ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖЕНЕРІЯ

DOI: 10.20535/kpissn.2024.1-4.314898

УДК 544.2/.6:664:665.5

Г.В. Сокольський

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

Відповідальний автор: g.sokolsky@kpi.ua

## ПРО МОЖЛИВОСТІ ЗАЛУЧЕННЯ ФОТОКАТАЛІТИЧНИХ МЕТОДІВ ДО ПІСЛЯВОЄННОЇ РЕМЕДІАЦІЇ ТЕРИТОРІЙ УКРАЇНИ

**Проблематика.** Фотокаталітичні (ФК) методи мають перспективи застосування в очищенні та знезараженні довкілля від органічних сполук, які забруднюють територію України внаслідок воєнних дій – вибухових речовин, бойових отруйних речовин хімічної зброї, паливно-мастильних матеріалів, збудників хвороб у воді та у ґрунті; для деградації мікропластику тощо.

**Мета дослідження.** Метою роботи було систематизувати наявні дані щодо можливості застосування ФК-методів для повоєнної ремедіації та відновлення територій України.

**Методика реалізації.** Досліджено стан проблеми й використано власний доробок для оцінювання можливостей прогресивних методів окиснення, таких як ФК, у відновленні екосистем після воєнних дій.

**Результати дослідження.** Показано здатність фотокаталізаторів на основі  $\text{TiO}_2$  до повної мінералізації тринітротолуолу, нервово-паралітичних агентів та їх модельних сполук, поліароматичних вуглеводнів, мікропластику, знешкодження небезпечних мікроорганізмів. Виокремлено перспективність технології відмивання ґрунтів розчинами поверхнево-активних речовин (ПАР) і комплексонів (хелатуючих агентів) із наступною послідовною ФК-мінералізацією органічних забруднювачів та адсорбційним видаленням важких металів. Виділено інші варті уваги методи – процеси на основі реакції Фентона (звичайний, електрокаталітичний, фотокаталітичний та фотоелектрокаталітичний її варіанти або електро-, фото-, фотоелектро-Фентон), дані, дотичні до проблематики відновлення територій після воєнних дій.

**Висновки.** Накопичено значний експериментальний матеріал використання фотокаталізу та інших передових процесів окиснення в лабораторних умовах, однак практичне застосування просувається досить повільно. Потребують вирішення проблеми економіки та енерговитрат на створення випромінювання. Утім, ефективність у процесах знешкодження вибухових речовин та отруйних речовин хімічної зброї довели такі фотокаталізатори, як титан діоксид та композити на його основі. Серед умов успішного застосування є відносно низький ступінь забруднення (менше 2 г/л) стічних вод, тому застосування ФК-методів для ремедіації територій є доцільним на стадіях доочищення. Треба здійснити оптимізацію підкладки для фотокаталізаторів, що допоможе вирішити проблеми стабільності й масштабування технології.

**Ключові слова:** післявоєнне відновлення територій; фотокаталіз;  $\text{TiO}_2$ .

### Вступ

Війна має руйнівний вплив на навколишнє середовище, зокрема відбувається руйнування промислових підприємств, будинків, інфраструктури, сільськогосподарських угідь тощо унаслідок використання зброї масового ураження. Це спричиняє аномальні забруднення та екологічні катастрофічні явища, що можуть зберігатися ще довго після закінчення воєнних дій. Довготермінові ефекти та впливи для війни в Україні наразі залишаються невідомими [1]. Відновлення

територій нашої держави, постраждалих від активних воєнних дій, вимагає ретельного аналізу наявного досвіду, його опрацювання та впровадження нових підходів. У час активної уваги до стану навколишнього середовища, розвитку парадигми зеленої економіки методологія заходів має відповідати сучасним вимогам.

### Постановка задачі

Виокремлення передових окиснювальних процесів (ПОП), зокрема ФК, є відносно новим

**Пропозиція для цитування цієї статті:** Г.В. Сокольський, “Про можливості залучення фотокаталітичних методів до післявоєнної ремедіації територій України”, *Наукові вісті КПІ*, № 1–4, с. 69–80, 2024. doi: 10.20535/kpissn.2023.1-4.314898

**Offer a citation for this article:** G.V. Sokolsky, “On possibility of involving photocatalytic methods in post-war remediation of territories of Ukraine”, *KPI Science News*, no. 1–4, pp. 69–80, 2024. doi: 10.20535/kpissn.2024.1-4.314898

явищем у науці й технологіях. Відомо, що використання сонячного світла як відновлювального джерела енергії має низку беззаперечних переваг. Утім, натепер опубліковано недостатню кількість робіт із проблематики ремедіації територій методами ПОП. Актуальним є узагальнення можливостей фотокаталізу із сучасної наукової точки зору. Залучення фотокаталізу для знешкодження забруднень після припинення воєнних дій є новітнім та перспективним підходом.

Під час застосування ПОП використовують екологічно чисті, однак відносно дорогі реагенти (озон, гідроген пероксид, Fe(II) тощо). Переваги ФК-варіанта ПОП полягають у можливості багаторазового використання та регенерації каталізатора. При цьому необхідно забезпечити відповідність позицій енергетичних зон провідності та валентної зони фотокаталізатора і редокс-потенціалів деградації органічної речовини-забруднювача, що уможливує направлений синтез або вибір фотокаталізатора для деградації конкретного продукту-забруднювача.

Таким чином, **мета дослідження** – систематизувати наявні дані щодо можливості застосування ФК-методів для повоєнної ремедіації та відновлення територій України.

**Методи дослідження.** У межах цієї роботи досліджено стан проблеми та використано власний доробок у сфері фотокаталізу для оцінювання можливостей прогресивних методів окиснення, таких як ФК, у відновленні екосистем після воєнних дій. Таким чином, використано теоретичні методи системного аналізу, синтезу, індукції та дедукції для виконання поставлених у роботі завдань.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Фотокаталіз відносять до ПОП. Перевагою та відмінною рисою останніх є нешкідливість для навколишнього середовища, оскільки вони не переносять забруднювальні речовини з однієї фази в іншу (як під час хімічного осадження та адсорбції), а також не утворюють величезної кількості небезпечного осаду. Є досить багато публікацій із фотокаталізу, однак кількість досліджень з використання фотокаталізу для післявоєнної ремедіації територій є дуже обмеженою й потребує систематизації та узагальнення.

## 1. Передові окиснювальні процеси

Передові окиснювальні процеси здатні перетворювати майже всі типи органічних забруднень на нешкідливі продукти, майже всі

вони засновані на генерації реакційно здатних гідроксильних радикалів ( $\bullet\text{OH}$ ) з окисно-відновним потенціалом 2,8 В (відносно стандартного водневого електроду). Вони атакують більшість молекул органічних забруднювачів з константами швидкості у межах  $10^6\text{--}10^9 \text{ M}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$  та ініціюють серію реакцій окиснення: Фентона, озонування, соноліз, фотокаталіз, ультрафіолетовий фотокаталіз та окиснення вологим повітрям.

Як і інші перспективні ПОП, електро-Фентон також вважають методом високоякісного очищення ґрунтових промивних розчинів без утворення мулу. Додавання солі заліза та  $\text{H}_2\text{O}_2$  може не знадобитися, оскільки сполуки заліза можна отримати безпосередньо із ґрунту, а гідроген пероксид генерується на електроді.

Під час застосування ПОП для очищення стічних вод слід враховувати, що використовуються доволі дорогі реагенти, такі як  $\text{H}_2\text{O}_2$  та/або  $\text{O}_3$ . Очевидно, що їх варто замінювати, коли це можливо, методами з більш економними реагентами для очищення, такими як біологічна деградація [3]. Потенціал ПОП може бути використаний під час інтеграції з біологічною обробкою *окисної деградації токсичних або тугоплавких речовин, які надходять або залишають біологічну стадію.*

Інший аспект застосування ПОП належить до забруднюючого навантаження відходів, яке зазвичай виражається як хімічна потреба у кисні (ХПК). *Лише відходи з відносно невеликою ХПК (вміст кисню менше 2 г/л) можуть бути належним чином оброблені за допомогою цих методів, оскільки більш висока ХПК вимагатиме споживання занадто великої кількості дорогих реагентів.* Відходи з високим вмістом забруднюючих речовин можна більш зручно обробляти за допомогою мокрого окиснення або спалювання. Особливий інтерес становлять системи ПОП, в яких можна використовувати природне сонячне УФ-випромінення: гетерогенний фотокаталіз із  $\text{TiO}_2$  та гомогенний – за допомогою процесу фото-Фентона [4].

### 1.1. Фотокаталітичні методи

Дієвий спосіб отримати вільні радикали й прискорити процес деградації – це ФК-механізм, що перебігає на поверхні напівпровідників (наприклад, діоксиду титану). У ФК-процесі радикали утворюються після поглинання фотокаталізатором кванта світла з енергією, достатньою для трансферу електрона у зону провідності



напівпровідника-каталізатора та окремого контакту учасників утвореної електрон-діркової пари з поверхнею. Згідно з визначенням IUPAC, фотокаталіз – це «зміна швидкості хімічної реакції або її ініціація під дією ультрафіолетового, видимого або інфрачервоного випромінювання за наявності речовини – фотокаталізатора, який поглинає світло і бере участь у хімічних перетвореннях учасників реакції». Відомі спроби комерціалізації методу, проте вони нечисленні [4].

Після того, як Фуджішіма та Хонда [6] у 1972 році відкрили явище фотоелектрокаталітичного розкладу води на  $\text{TiO}_2$ -електроді, опромінену ультрафіолетом, розпочались поглиблене дослідження ФК-властивостей діоксиду титану та інших сполук, розроблення методів синтезу наноматеріалів, пошук нових сфер використання фотокаталізу. Нині діоксид титану широко використовують як фотокаталізатор завдяки його високій активності, нетоксичності, низькій вартості, екологічності, хімічній інертності та каталітичній стабільності [7]. Діоксид титану – широкозонний напівпровідник *n*-типу з шириною забороненої зони для анатазу – 3,2 еВ, для рутилу – 3,0 еВ, для брукіту – 3,3 еВ, а також 3,34 еВ – для метастабільної  $\text{TiO}_2$  рамсделітної модифікації та 3,6 еВ – для метастабільної голандитної форми [8].

Валентна зона  $\text{TiO}_2$  утворена зовнішніми *p*-електронами оксигену, а дно зони провідності переважно утворене збудженими іонами титану. Особливе значення для прояву електронних властивостей діоксиду титану має наявність в його складі частково відновленого титану  $\text{Ti}^{3+}$ , який міститься приблизно на 0,2–0,8 еВ нижче зони провідності та виступає донором електрона. Наявність  $\text{Ti}^{3+}$  в багатьох випадках визначає провідність  $\text{TiO}_2$ . Питомий опір чистих анатазу і рутилу перебуває в діапазоні  $10^{-4}$ – $10^{-7}$   $\Omega \cdot \text{см}$ , але під час формування  $\text{Ti}^{3+}$  він зменшується до  $10^{-1}$   $\Omega \cdot \text{см}$  для анатазу і до  $10^{-2}$   $\Omega \cdot \text{см}$  для рутилу [9].

Комерційний фотокаталізатор  $\text{TiO}_2$  P25 («Evonik Industrials», Німеччина), що складається з аморфної фази і суміші анатазу/рутил у пропорції 80/20, у деяких реакціях проявляє більшу активність, ніж чисті кристалічні фази. Активність каталізатора P25 підвищується в результаті ефективного поділу носіїв заряду завдяки багатофазній природі частинок [1].

Наноматеріали, зокрема нанотрубки, нанодропи, нановолокна, нанострижні, нанопори

та наностінки, відіграють особливу роль і перебувають у центрі уваги дослідників через:

- їх велику площу поверхні;
- квантові або розмірні ефекти;
- чудові електронно-транспортні можливості;
- знижену електронно-діркову рекомбінацію [11].

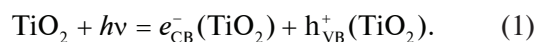
Використання наноструктурованого  $\text{TiO}_2$  значно збільшує його ФК-активність. Безперечною перевагою наночастинок порівняно з мікрочастинками є велика ймовірність виходу зарядів на поверхню каталізатора. Оскільки глибина проникнення УФ-світла в частинки  $\text{TiO}_2$  обмежена (близько 100 нм), то активною є тільки зовнішня поверхня [12]. Зменшення розмірів частинок до нанорозмірних значень сприяє поглинню світла у всьому об'ємі діоксиду титану. Отже, використання  $\text{TiO}_2$  у процесах гетерогенного фотокаталізу пов'язане з необхідністю отримати нанорозмірні частинки. У наш час наночастинки  $\text{TiO}_2$  отримують з різною морфологією, переважно це нанотрубки, нанодропи, нанострижні й мезопористі структури [13].

Для синтезу наночастинок  $\text{TiO}_2$  використовують такі методи, як гідротермальний, сольво-термічний, золь-гель, методи прямого окиснення, хімічне осадження з парової фази (CVD), електроосадження, сонохімічний та мікрохвильовий методи.

## 1.2. Механізм фотокаталітичної деградації органічних сполук

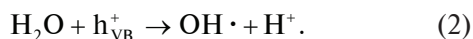
Схематично механізм фотоактивації і фотокаталізу на поверхні  $\text{TiO}_2$  УФ-випромінюванням зображено на рис. 1. Механізм утворення фотоактивної поверхні каталізатора включає утворення дірок у валентній зоні ( $h_{\text{VB}}^+$ ) та електронів у зоні провідності ( $e_{\text{CB}}^-$ ) за рахунок поглинання фотона енергії, більшої або рівної ширині забороненої зони ( $\geq E_{\text{BG}}$ ) напівпровідника. Для ширини забороненої зони 3,2 еВ довжина хвилі має бути меншою за 390 нм.

Сформована електрон-діркова пара має яскраво виражені окисно-відновні властивості й вступає в реакції з молекулами різноманітних сполук, що містяться поблизу або на поверхні діоксиду титану [14]:

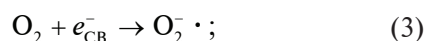


Електрон і дірка можуть рекомбінувати, виділяючи поглинену енергію у вигляді тепла, або

мігрувати до поверхні напівпровідника й ініціювати окисно-відновні реакції з адсорбованими на ньому молекулами води, органічних та інших забруднюючих сполук, що викликає їх мінералізацію. Позитивно заряджені дірки валентної зони можуть окиснювати молекули води або аніони  $\text{OH}^-$  з утворенням радикалів  $\text{OH}\cdot$  [15]:



Електрони зони провідності на поверхні  $\text{TiO}_2$  швидко захоплюються адсорбованим молекулярним киснем з утворенням супероксид радикала, який може реагувати з катіоном  $\text{H}^+$  з утворенням гідропероксид радикала  $\text{OON}\cdot$ :



Супероксид і гідропероксид радикали, як і гідроксид радикал, мають високий окисний потенціал і здатні мінералізувати органічні сполуки до  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$ :

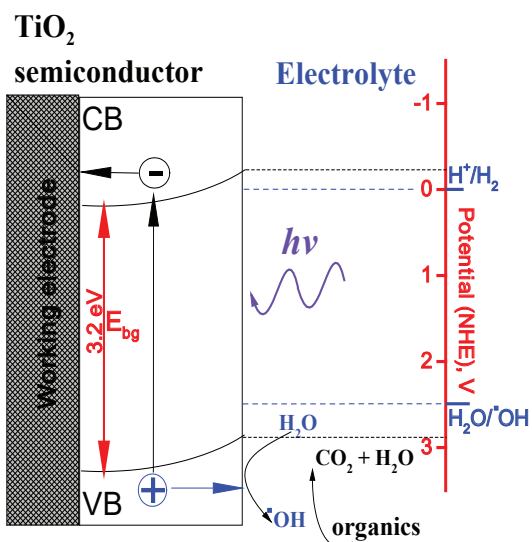
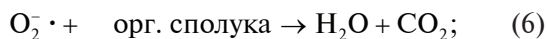
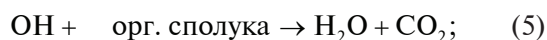


Рис. 1. Схематичне зображення механізму фотоактивації і фотокаталізу на поверхні  $\text{TiO}_2$  [14]

Таким чином, утворення в матеріалі електрон-діркових пар (екситонів) під дією світлового випромінювання та стимульований пере-

біг на поверхні  $\text{TiO}_2$  окисно-відновних реакцій за участю адсорбованих гідроксильних груп, молекул води, кисню приводить до утворення суперіонів  $\text{O}_2^- \cdot$ , радикалів  $\text{OH}\cdot$ ,  $\text{HO}_2\cdot$ , які здатні активно деструктувати органічні речовини [12, 14].

Діоксид титану як фотокаталізатор працює тільки в УФ-діапазоні, що становить лише 4 % сонячного спектру. Більш привабливо використати видимий діапазон випромінювання. Для вирішення цієї проблеми застосовують багато методів, серед них використання напівпровідникових матеріалів з більш вузькою шириною забороненої зони (близько 2 eV) – «band gap engineering», використання «coupling effects» або гетеропереходів для розділення зарядів генерованих електронів і дірок [12].

Деякі природні окисно-відновні системи можуть виконувати ФК-функції, зокрема в живих організмах. Як відомо, кластер  $\text{CaMn}_4\text{O}_4$  входить у систему фотосинтезу рослин. Високу каталітичну активність діоксиду мангану пояснюють, крім іншого, його здатністю підтримувати ФК-процеси в діапазоні як видимого світла, так і УФ-випромінювання для деградації органічних сполук, приміром барвників [16]. Важкорозчинний, діоксид мангану не становить екологічної небезпеки. Нами розроблено підходи до синтезу сполук оксидів мангану та його реалізації у фото-, електро- та фотоелектрокаталітичних процесах. Показано високу каталітичну активність  $\text{MnO}_2$  в окисненні  $\text{CO}$ , водорозчинної форми нафтопродуктів, електрокаталітичного знешкодження фенолу і барвників [17, 18].

Є й інші перспективні напівпровідникові матеріали щодо ефективної ФК-деградації органічних сполук, задокументовані в літературі:

- оксиди металів ( $\text{ZnO}$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{WO}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ );
- сульфід металів ( $\text{ZnS}$ ,  $\text{CdS}$ ,  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{Bi}_2\text{S}_3$ ,  $\text{CuS}$  /  $\text{ZnS}$ );
- тринарні сполуки ( $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{SrTiO}_3$ ,  $\text{BiVO}_4$ ,  $\text{Bi}_2\text{WO}_6$ );
- неметалічні напівпровідники ( $\text{C}_3\text{N}_4$ , графен);
- багатокомпонентні та доповані матеріали тощо [19].

## 2. Можливі напрями застосування ФК-процесів

Основна перевага ФК-процесів, основаних на окисненні – це можливість ефективно використовувати сонячне світло або УФ-випромінювання як джерело енергії.

Вкрай важливою проблемою для навколишнього середовища в результаті воєнних дій є забруднення води, зокрема можливість розвитку інфекцій чи хвороб. Забруднення ґрунтів, їх ерозія, втрата родючості є наступним великим викликом для України. Ремедіація території після припинення воєнних дій вимагає інноваційних підходів. Наприклад, досліджено технологію, що поєднує промивання ґрунту та фотокаталіз – для видалення й розкладання ароматичних сполук, наявних у вибитих ґрунтах забрудненого промислового майданчика. Показано зменшення вмісту токсичних сполук через зниження концентрації органіки у відходах [20]. Фотоелектрокаталітичне окиснення позитивно оцінене для дезінфекції води і стічних вод [14].

За результатами аналізу літературних даних нами виділено цільові щодо залучення ФК та інших ПОП методів об'єкти деградації воєнного призначення: *вибухові речовини, компоненти хімічної зброї, поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВВ), продукти неповного згорання; пластик, зокрема мікропластик* тощо.

Результатом інтенсивних досліджень основних причин забруднення води стали ідентифікація та розуміння впливу нових забруднювачів, моніторинг яких став можливим лише завдяки останнім досягненням у технологіях виявлення та стандартах. Нові забруднювачі розділяють на класи залежно від мети, для якої вони служать, і їх походження; щоб упорядкувати аналіз їх наявності та методи їх видалення, їх поділяють на такі категорії:

- стійкі органічні забруднювачі;
- фармацевтичні препарати та засоби особистої гігієни;
- хімічні речовини, що порушують роботу ендокринної системи;
- сільськогосподарські хімікати (пестициди, гербіциди) [21].

Фотокаталітичні процеси набули широкого розвитку в технологіях самознезаражувальних/самоочисних поверхонь. Майже всі застосування фотокаталізу спрямовані на окиснювальну мінералізацію небезпечних, екологічно шкідливих молекул, а також мікроорганізмів (бактерій, вірусів, спор тощо). Використання водної суспензії фотокаталізатора має низку недоліків, тому в деяких роботах пропонуються варіанти іммобілізації фотокаталізаторів, зокрема біополімерами [22].

### 3. Фотокаталітична деградація активних компонентів хімічної зброї, вибухових та інших продуктів

Більшість хімічних отруювальних та вибухових речовин є органічними сполуками, що зазвичай важко піддаються біологічній деградації, тому можна використовувати методи ПОП, зокрема ФК, для більш ефективної ремедіації ґрунтів і забруднених вод. Вище зазначалося про необхідність дотримання економічних критеріїв доцільності обробки, концентраційних діапазонів, що відповідають вмісту менше 2 г/л, для успішного використання ПОП та переваги поєднання з біологічними стадіями.

Розглянемо наявні літературні дані щодо деяких вибухових речовин (тротил) та отруйних компонентів хімічної зброї (зарин, зоман, VX). Через високу токсичність і низьку здатність до біологічного розкладання 2,4,6-тринітро-толуол (ТНТ, тротил) є однією з найбільш небезпечних вибухонебезпечних сполук, які впливають на систему підземних вод та ґрунтів на територіях активних бойових дій Першої та Другої світових воєн і не тільки [23]. За даними армії США, понад 1,2 млн тонн ґрунту було забруднено вибуховими речовинами, і вплив такого забруднення в інших країнах є не меншим за масштабами [24]. Концентрація ТНТ у забрудненому ґрунті може досягати 50 г/кг ґрунту [25] з найвищим рівнем забруднення на поверхні ґрунту або поблизу нього. Як наслідок, Агентство з охорони навколишнього середовища США (USEPA) встановило мету рекультиваци – 17,2 мг·кг<sup>-1</sup> ТНТ у ґрунтах, критерій для навколишнього середовища – 0,06 мг·л<sup>-1</sup> [26], для питної води – 2 мкг/л.

Ділліерт та ін. [27] вивчали деградацію ТНТ в опромінених ( $\lambda = 320$  нм) розчинах, а також у суспензіях TiO<sub>2</sub>, змінюючи концентрацію H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> та рН, вони показали, що в нейтральному та лужному розчинах (без H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) 78 % і 57 % початкового тротилу прореагували протягом 2 год. за рН 7 і 11 відповідно. Утім, у суспензіях TiO<sub>2</sub> швидкість розкладання значно підвищується порівняно з гомогенними розчинами за всіх досліджених рівнів рН. Шмеллінг і Грей [28] досліджували ФК-мінералізацію тротилу (ТНТ = 0,22 мМ, O<sub>2</sub> = 40,0 мг·л<sup>-1</sup> та  $\lambda > 340$  нм) у 250 мг·л<sup>-1</sup> суспензії TiO<sub>2</sub>. Результати демонструють, що у забруднених тротилом водах досягається майже повна мінералізація цієї речовини.

Також Son та ін. [29] досліджували вплив різних параметрів, таких як вихідна концентрація ТНТ і початковий рН, на швидкість деградації за наявності УФ-випромінювання і  $\text{TiO}_2$ -катализатора. Вони зробили висновок, що швидкість реакції описується псевдопершим порядком за кінетичною моделлю Ленгмюра–Хіншельвуда. Ступінь перетворення ТНТ унаслідок фотолізу і ФК-реакції, що проводилися протягом 150 хв, становили 72 % і 100 % відповідно (після такого ж періоду часу зниження загальної концентрації органічних сполук становило 40 % і 80 %).

Хармон [30] дослідив ФК-деметилування тротилу за допомогою тетрафенілпорфіринсульфонату (TPPS). Справді, освітлення TPPS,  $\text{CuTPPS}$  і  $\text{FeTPPS}$  у розчині з 0,53 М тротилу з рН = 7 за кімнатної температури за допомогою вольфрамової лампи розкладає ТНТ до тринітробензойної кислоти і тринітробензолу. Швидкість деградації тротилу відповідає серії  $\text{TPPS} > \text{FeTPPS} > \text{CuTPPS}$ .

Знищення арсеналів або запасів хімічної зброї є важливою умовою успішного виконання Конвенції про хімічну зброю, яка була відкрита для підписання у 1993 році. У випадках унеможливленого транспортування або віддаленої локалізації такої зброї для знезараження території пропонується як економічно доцільний варіант використовувати методи ПОП, зокрема ФК [30, 32].

Фотокаталітичний метод деградації бойових отруйних речовин – компонентів хімічної зброї описано в роботі [31]. У додатках статті на основі досвіду США детально описано традиційні стратегії до демілітаризації хімічної зброї (окрім базової технології спалювання). Перша стратегія включає низькотемпературну рідкофазну детоксикацію та окиснення вологим повітрям (WAO). Другою стратегією є мінералізація. У цю категорію включено окиснення у надкритичній воді (SCWO), низькотемпературні процеси окиснення та за низького тиску і високотемпературні процеси піролізу та під тиском.

Досліджено деструкцію аналога відомих нервово-паралітичних агентів методом фотокаталізу [32]. Показано, що активоване вугілля (5–25 мас. %) активізує легований азотом діоксид титану щодо деградації. Запропоновано пояснення, що переважне утворення активних форм кисню відбувається на фотокаталізаторі, а адсорбція молекули бойового хімічного агента – на вуглі. Ефективне ФК-розкладання бойових хімічних речовин є процесом, який може

бути застосований у доочистці після деградації іншими методами, у надзвичайних ситуаціях або для контрольованого знищення запасів бойових хімічних речовин. Ряд гетерогенних фотокаталізаторів, що містять композити  $\text{TiO}_2$ -активоване вугілля або N- $\text{TiO}_2$ -активоване вугілля, демонструють чудову фотокаталітичну активність для повного розкладання іприту, зоману та VX у високих концентраціях. Така активність виникає унаслідок синергізму між адсорбцією на активному вугіллі та фотоактивністю діоксиду титану. Азотування робить композит також активним під впливом видимого світла.

Дослідження щодо дезактивації бойового хімічного іприту мають декілька цілей, зокрема нейтралізацію знайдених боєприпасів, очищення уражених районів, а також розробку захисного обладнання чи інструментів. Нейтралізація пухирчастого сірчаного іприту передбачає різні хімічні шляхи, такі як гідроліз, дегідрохлорування, окиснення або повну мінералізацію [33].

Повідомляється про мезопористий композитний матеріал MIL-101(Cr) з молекулами порфірину (позначено як TCPP@MIL-101(Cr), TCPP = тетра(4-карбоксіфеніл)порфірин), який можна використовувати як гетерогенний фотокаталізатор для детоксикації симуляторів іприту 2-хлоретил етилсульфіду до 2-хлоретил етилсульфоксиду з періодом напіврозпаду 1 хв. Каталітичні характеристики TCPP@MIL-101(Cr) можна порівняти з характеристиками гомогенного молекулярного порфірину. Механістичні дослідження показують, що як  $^1\text{O}_2$ , так і  $\text{O}_2^{\cdot-}$  ефективно генеруються та відіграють життєво важливу роль у реакції окиснення. Наночастинки золота (AuNP) приєднували до TCPP@MIL-101(Cr) для посилення каталітичної активності з контрольним періодом напіврозпаду 45 с, що на сьогодні є рекордом.

Поліциклічні ароматичні вуглеводні є повсюдними забруднювачами навколишнього середовища, оскільки є побічними продуктами переробки або спалювання вихлопного палива. Через гідрофобні та стійкі властивості ПАВВ легко адсорбуються на твердих частинках, є не леткими й не піддаються біологічному розкладанню. Відомі переваги ПОП у видаленні ПАВВ із забруднених ґрунтів.

Проведено роботи з модифікації та збільшення поверхні  $\text{TiO}_2$ . Вивчено фотокаталітичну деградацію суміші 16 ПАВВ у забрудненому ґрунті, після використання катализатора  $\text{TiO}_2$  на великій площі поверхні досягнуто 93–99 %



їх вилучення. *Нанорозмірний (10–30 нм) анатаз*  $\text{TiO}_2$  *здатний до рекультивациі забруднених стійкими органічними забруднювачами ґрунтів* [34]. Згодом у дослідженнях було підтверджено підвищення швидкості ФК-деградації ПАВВ завдяки додаванню  $\text{H}_2\text{O}_2$ .

Прикладом інших перспективних ФК-матеріалів є композити  $\text{TiO}_2/\text{MnO}_2$ . Завдяки забороненій зоні  $\text{MnO}_2$  у межах 0,26–2,7 еВ вони можуть поглинати видиме світло та, теоретично, навіть ІЧ-випромінення. Композитні матеріали  $\text{TiO}_2/\text{MnO}_2$  успішно синтезували у вигляді вертикально орієнтованих самоорганізованих масивів нанотрубок за допомогою одноетапного анодного окиснення сплавів  $\text{Ti-Mn}_2$  у розчині електроліту на основі етиленгліколю [35]. Досліджували вплив прикладеного потенціалу (30–50 В), вміст мангану у сплаві (5–15 мас. %) і вміст води в електроліті (2–10 об. %) на морфологію та фотокаталітичні властивості. Фотоактивність оцінювали в реакції видалення толуолу у видимому світлі, використовуючи малопотужні світлодіоди як джерело опромінення ( $\lambda_{\text{max}} = 465$  нм). Морфологічний аналіз показав, що нанотрубки на поверхні сплаву мають діаметр 76–118 нм, довжину 1,0–3,4 мкм, а товщину стінки 8–11 нм. Усі зразки були фотоактивними під впливом видимого світла, найвищий рівень досягнутої деградації становив 43 % після 60 хв опромінення. Є повідомлення про окреме використання мезопористих допованих  $\text{Ce/Zr}$  каталізаторів на основі  $\delta\text{-MnO}_2$  для мінералізації активних компонентів хімічної зброї (зарін, зоман, VX) [36].

#### 4. Технології відмивання ґрунтів для ремедіації територій

Методи відмивання ґрунтів є досить продуктивними для видалення важких металів [37] – типових забруднювачів мілітарного походження, що не настільки успішно видаляються ФК-методами. Проте фотокаталіз може успішно розкласти стічні води з «відмитими» із ґрунту важкими металами за допомогою хелатних агентів (чи інших речовин/сполук) для вирішення аналогічного завдання. Наприклад, Satigo та ін. [38] для вилучення важких металів із забрудненого ґрунту використовували етилендіамін- $\text{N,N}'$ -діянтарну кислоту (ЕДДЯК). Стічні води від промивання ґрунту очищали за допомогою послідовності ФК та адсорбційних процесів, щоб знизити концентрацію металів (Cu,

Zn, Fe й Mn) нижче гранично допустимої концентрації для скидання в муніципальну каналізацію й видалення ЕДДЯК. Результати контролювали з використанням живих організмів (*Daphnia magna*, *Vibrio fischeri*, *Pseudokirchneriella subcapitata* та *Lepidium sativum*) на стоках промивання ґрунту до та після обробки, щоб оцінити вплив запропонованого комбінованого процесу.

Відмивання ґрунтів основане на використанні водних розчинів ПАР з можливістю солюбілізації мицел та зменшення поверхневого натягу між промивною рідиною та частинками ґрунту, і, таким чином, на десорбцію розчиненої речовини та її вихід із пор ґрунту. Не-іонні ПАР пропонуються через низьку критичну концентрацію мицелоутворення (ККМ) та високу здатність до солюбілізації [20]. Утім, до цього часу широко застосовували аніонні ПАР, що мають значно вищі значення ККМ та залишкові концентрації. Водні розчини, що містять неіоногенний ПАР Brij 35, використовували для вилучення забруднювальних речовин із зразків ґрунту. Фотокаталітична обробка отриманих відходів промивання, виконана за наявності суспензій  $\text{TiO}_2$ , опромінені імітованим сонячним світлом, показала повільне зменшення токсичних сполук через відповідні концентрації органіки у відходах. Суттєве покращення продуктивності процесу отримали за наявності доданого  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$  [20].

ґрунти колишніх промислових і воєнних об'єктів забруднені вуглеводневими сполуками нафти, ПАВВ, поліхлорбіфенілами або хлорованими розчинниками та іншими гідрофобними органічними сполуками. У роботі [39] розроблено процес промивання ґрунту, посилений використанням екстрагентів (ПАР або циклодекстрини). Утім, використання великої кількості екстрагентів також є критичним недоліком, зокрема й щодо економічної ефективності. Додаткова стадія очищення розчинів відмитих ґрунтів може здійснюватися з допомогою деградації методами ПОП, зокрема ФК, або анодним окисненням.

Досліджено фотодеградацію пентахлорфенолу у складній системі, що містить одиночні або змішані ПАР з використанням фотокаталізатора графен- $\text{TiO}_2$ , щоб краще зрозуміти поведінку ПАР у ФК-системі із графеном для відновлення ґрунту, забрудненого гідрофобними органічними сполуками [31]. Випробування із промивання ґрунту/фотокаталізатора довели, що промивання ґрунту аніонно-неіонними змішаними ПАР в поєднанні з фотокаталізом



на графен- $\text{TiO}_2$  може бути однією з перспективних технологій для рекультивациі ґрунту, забрудненого ГОС.

Гетерогенний фотокаталіз має низку переваг для обробки відходів після промивання ґрунту. Цей процес дозволяє не тільки здійснювати ефективну деградацію великої кількості органічних забруднювачів, *наявних у помірних концентраціях у водних відходах, але в більшості випадків приводить до повної мінералізації таких сполук* [32]. Отже, принципово можливо за допомогою описаних ФК-підходів і технологій відмивання ґрунтів видаляти комбіновані забруднювачі на основі важких металів та органічних сполук, і вони можуть бути моделями щодо мілітарних об'єктів.

### 5. Фотокаталіз у боротьбі із пластиком і мікропластиком

За останнє століття використання пластикових матеріалів експоненціально зросло, а пластикові відходи стали однією з найпоширеніших форм забруднення у світі. Негативна роль мікропластику в навколишньому середовищі стає очевидною проблемою [41, 42]. Руйнування різних об'єктів унаслідок воєнних дій на території України за останні два роки спричиняє значні масштаби забруднення полімерними матеріалами. Виробництво й використання виробів на основі пластику, таких як упаковка для продуктів харчування та витратні матеріали, значно зростає, щоб задовольнити потреби військових. Крім того, утилізація пластикових відходів стає проблемою через порушення систем управління відходами та руйнування інфраструктури.

Найбільш поширеними способами утилізації пластику, зокрема поліетилену, є механічна, хімічна переробка та піроліз. Ці методи, окрім переваг, мають дуже вагомні недоліки, серед яких варто зазначити високі енергетичні потреби процесу утилізації, що може зробити його економічно недоцільним, також використання токсичних реагентів чи генерування небезпечних побічних продуктів може чинити негативний вплив на довкілля та на здоров'я людини. Застосування ФК-методів для деградації полімерних плівок описано в літературі [43, 44]. Нами раніше показано ефективність механічних сумішей оксидів мангану/титану для ФК-деградації ПЕ-плівок [45].  $\text{MnO}_2$  повільно розкладає пластик навіть у темряві й активує дію  $\text{TiO}_2$  анатазу під дією УФ-випромінювання і сонячного світла.

### 6. Знешкодження мікроорганізмів

Найкращу антимікробну активність демонструє нанорозмірний  $\text{TiO}_2$  [46], його можна використовувати у воді як дезінфікуючий матеріал. Іммобілізація  $\text{TiO}_2$  усуває потребу у відновленні та регенерації каталізатора, але також пов'язана зі зниженням фотокаталітичної ефективності порівняно зі звичайними суспензіями [4]. *Salmonella typhimurium* і *Listeria monocytogenes* були розщеплені фотокаталізатором під дією УФ-випромінювання. Утім, *Listeria monocytogenes* виявилася більш стійкою до деградації порівняно з *Salmonella typhimurium*. Механізм включав пошкодження клітинної стінки й мембрани, що призвело до розливу внутрішнього вмісту. Концентрація наночастинок  $\text{TiO}_2$  значною мірою впливала на каталітичну реакцію, при цьому *концентрація 1 г/л давала найкращі результати* [47]. Доведено, що допування азотом викликає посилену інактивацію бактерій *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* та *Bacillus cereus*. Допування проводили з використанням різних азотовмісних сполук, таких як сечовина, аміак і триетиламін.

### 7. Фотокаталіз для стійкого сільського господарства

Кінцевою метою ремедіації, рекультивациі середовища уражених воєнними діями територій є відновлення й повернення цих ресурсів, зокрема до ведення сільського господарства. Утім, роль фотокаталізу не обмежується стадією рекультивациі/ремедіації. Відомо, що ФК-матеріали привертають увагу як нові ресурси для сільського господарства. Наявні розробки щодо використання ФК-наноматеріалів на основі біосумісного  $\text{TiO}_2$  для вирішення проблем сільського господарства (зростання врожаю і його збору тощо).

Додаткове залучення біологічних підходів і ретельний аналіз структурних пошкоджень мають сприяти прискоренню практичного внеску  $\text{TiO}_2$  у стає сільське господарство [48]. Також додавання  $\text{TiO}_2$  і плазмова фіксація азоту будуть корисні на підприємствах, де обробляють, фасують чи пророщують насіння рослин. Використання  $\text{TiO}_2$  з розміром наночастинок 40 нм (менше 10 мкг/л) сприяє проростанню насіння та додатковому подовженню коренів. Утім, лише приблизно 5 % поточних досліджень було проведено в реальних сільськогосподарських умовах [32].

Пророщування насіння для досягнення економічно ефективного процесу збирання врожаю може бути ускладнене через можливе зараження насіння під час зберігання грибками або бактеріями, які можуть пошкодити проростання або розвиток рослин чи їх коренів, впливаючи на якість продукції. Крім того, добрива є джерелами мікробного й токсичного забруднення, яке має згубний вплив. Використання ФК-матеріалів  $\text{TiO}_2$  для цілей стійкого сільського господарства позитивно впливатиме на харчовий цикл людини, а також допоможе долати сільськогосподарську кризу, спричинену перенаселенням світу, яка виникає внаслідок кліматичних змін.

## 8. Промислове застосування й перспективи

Фотокаталізатори, описані в літературі, є досить різноманітними, їх вибір залежить від природи забруднювача (вибухові, отруйні речовини, ПАВВ тощо). Фотокаталіз з використанням діоксиду титану є широко дослідженою реакцією зі значним потенціалом, про що свідчить велика кількість публікацій та експериментів, проведених на промислових та інших стічних водах, вимитих із ґрунтів водах з використанням ПАР, фотокаталізаторів й адсорбентів. *Синтезовані матеріали на основі  $\text{TiO}_2$  мають переваги – можливість повторного використання та ефективну деградацію.* На відміну від інших варіантів, для цілей фотокаталізу нанорозмірні матеріали виявилися найбільш ефективними результатами модифікації  $\text{TiO}_2$ . Відомо, що наноструктури значно активніше мінералізують органічні сполуки за більш м'яких умов експлуатації. Вони також більш економічні (після синтезу), і тому кращі для використання у великих масштабах і промислового застосування.

*Утім, фактичне застосування  $\text{TiO}_2$  у промислових масштабах для очищення стічних вод наразі є незначним. Ймовірно, це пов'язано з тим, що  $\text{TiO}_2$  є відносно дорогим. Забезпечення нанорозмірності, а також виготовлення композитів, допованих, модифікованих матеріалів на його основі*

*є досить складним процесом. Значні енергетичні витрати пов'язані із забезпеченням освітлення в УФ-діапазоні.*

## Висновки

Проведений аналіз літератури свідчить про значне оновлення знань у сфері ПОП, про необхідність їх детального вивчення та практичного використання. За результатами проведеного огляду зазначимо, що заслуговує на увагу процес електро-Фентона. Повної мірою це стосується й ФК-процесів. Вимоги відповідності параметрів енергетичної забороненої зони напівпровідника-фотокаталізатора термодинамічним характеристикам деградації цільового процесу, мінімізація рекомбінації носіїв заряду дозволяють прогнозувати й обирати ефективні матеріали та область випромінювання, умови реакції. Ефективність у процесах знешкодження вибухових речовин, отруйних речовин хімічної зброї та ПАВВ довели такі фотокаталізатори, як титан діоксид та композити на його основі.

Накопичено значний експериментальний матеріал використання фотокаталізу та інших передових процесів окиснення в лабораторних умовах, однак практичне застосування просувається досить повільно. Потребують вирішення проблеми економіки та енерговитрат на створення випромінювання. *Лише відходи з відносно низькою гранично допустимою концентрацією (менше 2 г/л) можуть бути належним чином оброблені. Застосування ФК-методів для ремедіації є доцільними внаслідок їх унікальних можливостей на стадіях доочищення.*

Маючи великі екологічні переваги, гетерогенні відпрацьовані фотокаталізатори легко розділяються з очищеною від забруднювачів водною фазою, однак для найбільш ефективних нанорозмірних фотокаталізаторів процедура буде технічно складнішою. Для уникнення подібних проблем слід вибрати оптимальну підкладку для фотокаталізаторів. Це також допоможе вирішити проблеми стабільності та масштабування лабораторної установки.

## References

- [1] D. Rawtani, G. Gupta, N. Khatri, P. K. Rao and C. M. Hussain, "Environmental damages due to war in Ukraine: A perspective", *Sci. Total Environ.*, vol. 850, pp. 157932, 2022.
- [2] S. Lacombe, N. Keller, "Photocatalysis: fundamentals and applications in JEP 2011", *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 19, no. 9, pp. 3651–3654, 2011.
- [3] S. Kuppusamy, P. Thavamani, K. Venkateswarlu, Y.B. Lee, R. Naidu and M. Megharaj, "Remediation approaches for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) contaminated soils: Technological constraints, emerging trends and future directions", *Chemosphere*, 168, pp. 944–968, 2017.

- [4] S. Malato, J. Blanco, A. Vidal, & C. Richter, “Photocatalysis with solar energy at a pilot-plant scale: an overview”, *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 37 (1), pp. 1–15, 2002. doi:10.1016/s0926-3373(01)00315-0.
- [5] Glossary of terms used in photochemistry, 3rd edition (IUPAC Recommendations 2006). *Pure and Applied Chemistry*, vol. 3, Pure and Applied Chemistry, 293 p., 2007.
- [6] A. Fujishima, K. Honda, “Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode”, *Nature*, vol. 238, pp. 37–38, 1972. <https://doi.org/10.1038/238037a0>.
- [7] M.A. Irshad, R. Nawaz, Ur. Rehman, M. Adrees, M. Rizwan, S. Ali, S. Ahmad and S. Tasleem, “Synthesis, characterization and advanced sustainable applications of titanium dioxide nanoparticles: A review”, *Ecotoxicology and environmental safety*, vol. 212, 111978 p., 2021.
- [8] R. Sanjines, H. Tang, H. Berger, F. Gozzo, G. Margaritondo and F. Lřvy, “Electronic structure of anatase TiO<sub>2</sub> oxide”, *Journal of Applied Physics*, vol. 75 (6), pp. 2945–2951, 1994.
- [9] A. Velichenko, V. Kordan, O. Shmychkova, V. Knysh and P. Demchenko, “The effect of Ti/TiO<sub>2</sub> treatment on morphology, phase composition and semiconductor properties”, *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, no. 4, pp. 18–23, 2022.
- [10] W.R. Siah, H.O. Lintang, M. Shamsuddin and L. Yuliati, “High photocatalytic activity of mixed anatase-rutile phases on commercial TiO<sub>2</sub> nanoparticles” *INOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 107, no. 1, 012005 p., 2016.
- [11] G.G. Bessegato, T.T. Guaraldo, J.F. de Brito, M.F. Brugnera and M.V. Zanoni, “Achievements and trends in photoelectrocatalysis: from environmental to energy applications” *Electrocatalysis*, Sep, vol. 6, pp. 415–441, 2015.
- [12] A.I. Крюков, O.I. Стрюк, С.Я. Кучмий, В.Д. Походенко, “Нанофотокаталіз”, *Ін-т фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського НАН України, Монограф., К.: Академперіодика*, 2013.
- [13] X. Chen, S.S. Mao, “Titanium dioxide nanomaterials: synthesis, properties, modifications, and applications”, *Chem. Rev.*, vol. 107, pp. 2891–2959, 2007.
- [14] M. Zahorni and G. Sokolsky, “Nanosized titania composites for reinforcement of photocatalysis and photoelectrocatalysis”, *Monograph, Cambridge Scholars Publishing*, 2022.
- [15] L. Ding, “The vital role of surface Brønsted acid/base sites for the photocatalytic formation of free OH· radicals”, *Applied Catalysis B: Environmental*, 266, pp.118634, 2020.
- [16] M. Zhong, M. Li, Z. Fan, W. Huang, H. Hao, Z. Xia, Q. Zhang, H. Peng, and Y. Zhang, “Tuning the crystallinity of MnO<sub>2</sub> oxidant to achieve highly efficient pollutant degradation”, *Chin. Chem. Lett.*, P. S1001841722000985, 2022.
- [17] N.D. Ivanova, S.V. Ivanov, E.I. Boldyrev, G.V. Sokol’skii and I.S. Makeeva, “High-Performance Manganese Oxide Catalysts for CO Oxidation”, *Russ. J. Appl. Chem.*, vol. 75, no. 9, pp. 1420–1423, 2022.
- [18] G.V. Sokol’skii, S.V. Ivanov, N.D. Ivanova, E.I. Boldyrev, T.F. Lobunets and T.V. Tomila, “Doped manganese (IV) oxide in processes of destruction and removal of organic compounds from aqueous solutions”, *Journal of Water Chemistry and Technology*, vol. 34, pp. 227–233, 2012.
- [19] J. Bedia, V. Muelas-Ramos, M. Pecas-Garzyn, A. Gımez-Avilııs, J.J. Rodrıguez, C.A. Belver, “Review on the Synthesis and Characterization of Metal Organic Frameworks for Photocatalytic Water Purification”, *Catalysts*, vol. 9 (1), 52 p., 2019. <https://doi.org/10.3390/catal9010052>.
- [20] D. Fabbri, A.B. Prevot, V. Zelano, M. Ginepro and E. Pramauro, “Removal and degradation of aromatic compounds from a highly polluted site by coupling soil washing with photocatalysis”, *Chemosphere*, vol. 71, no. 1, pp. 59–65, 2008.
- [21] K.P. Gopinath, N.V. Madhav, A. Krishnan, R. Malolan and G. Rangarajan, “Present applications of titanium dioxide for the photocatalytic removal of pollutants from water: A review”, *Journal of Environmental Management*, vol. 270, 110906 p., 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110906>.
- [22] E.P. Ivanova, K. Bazaka, and R.J. Crawford, “2-Natural polymer biomaterials: advanced applications”, in *New Functional Biomaterials for Medicine and Healthcare*, Woodhead Publishing, pp. 32–70, 2014.
- [23] K. Ayoub, E. D. van Hullebusch, M. Cassir and A. Bermond, “Application of advanced oxidation processes for TNT removal: A review”, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 178, no. 1–3, pp. 10–28, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.02.042>.
- [24] T.A. Lewis, D.A. Newcombe and R.L. Crawford, “Bioremediation of soils contaminated with explosives”, *Journal of Environmental Management*, vol. 70, no. 4, pp. 291–307, 2004.
- [25] J.M. Conder, T.W. La Point, A.T. Bowen, “Preliminary kinetics and metabolism of 2,4,6-trinitrotoluene and its reduced metabolites in an aquatic oligochaete”, *Aquat. Toxicol.*, vol. 69, pp. 199–213, 2004.
- [26] R. Alnaizy, A. Akkgerman, “Oxidative treatment of high explosives contaminated wastewater”, *Water Res.* Vol. 33, pp. 2021–2030, 1999.
- [27] R. Dillert, I. Fornefett, U. Siebers and D. Bahnemann, “Photocatalytic degradation of trinitrotoluene and trinitrobenzene: influence of hydrogen peroxide”, *J. Photochem. Photobiol. A*, vol. 94, pp. 231–236, 1996.
- [28] D.C. Schmelling, K.A. Gray, “Photocatalytic transformation and mineralization of 2,4,6 trinitrotoluene in TiO<sub>2</sub> Slurries”, *Water Res.*, vol. 29, pp. 2651–2662, 1995.

- [29] H. Son, S. Lee, I. Cho, K. Zoh, “Kinetics and mechanism of TNT degradation in TiO<sub>2</sub> photocatalysis”, *Chemosphere*, vol. 57, pp. 309–317, 2004.
- [30] H.J. Harmon, “Photocatalytic demethylation of 2,4,6-trinitrotoluene by porphyrins”, *Chemosphere*, vol. 63, pp. 1094–1097, 2006.
- [31] M.L. Hitchman, R.A. Spackman, F.J. Yusta and B. Morel “A feasibility study of the destruction of chemical weapons by photocatalytic oxidation”, *Science & Global Security*, vol. 6, no. 2, pp. 205–237, 1997. doi: 10.1080/08929889708426438.
- [32] K. Kim, D.A. Atwood and D.G. Churchill, “Destruction and Detection of Chemical Warfare Agents”, *Chem. Rev.*, vol. 111, no. 9, pp. 5345–5403, 2011. <https://doi.org/10.1021/cr100193y>.
- [33] E. Oheix, E. Gravel and E. Doris, “Catalytic Processes for the Neutralization of Sulfur Mustard”, *Chem. Eur. J.*, vol. 27, 54 p., 2021.
- [34] M. Cheng, G. Zeng, D. Huang, C. Lai, P. Xu, C. Zhang, and Y. Liu, “Hydroxyl radicals based advanced oxidation processes (AOPs) for remediation of soils contaminated with organic compounds: A review”, *Chem. Eng. J.*, vol. 284, pp. 582–598, 2016.
- [35] M.C. Nevbregz-Martinez, M.P. Kobylański, P. Mazierski, J. Wyłkiewicz, G. Trykowski, A. Malankowska, M. Kozak, P.J. Espinoza-Montero and A. Zaleska-Medynska, “Self-organized TiO<sub>2</sub>–MnO<sub>2</sub> nanotube arrays for efficient photocatalytic degradation of toluene”, *Molecules*, vol. 22, no. 4, 564 p., 2017.
- [36] L. Wu, X.L. Kong, G. Yueting, S. Yaxin, Z. Chonglin, C. Wenming, Z. Yanjun and L. Congju, “Mesoporous Mn-based multi-component metal oxide for fast chemical warfare agent degradation”, *AIP Advances*, vol. 12, no. 3, 2022. 12. 035038. [10.1063/5.0083018](https://doi.org/10.1063/5.0083018).
- [37] G. Dermont, M. Bergeron, G. Mercier and M. Richer-Laflèche, “Soil washing for metal removal: a review of physical/chemical technologies and field applications”, *J. Hazard. Mater.*, vol. 52, no. 1, pp. 1–31, 2008. doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.10.043.
- [38] S. Satyro, M. Race, F. Di Natale, A. Erto, M. Guida and R. Marotta, “Simultaneous removal of heavy metals from field-polluted soils and treatment of soil washing effluents through combined adsorption and artificial sunlight-driven photocatalytic processes”, *Chemical Engineering Journal*, vol. 283, pp. 1484–1493, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.08.039>.
- [39] C. Trellu, Y. Pechaud, N. Oturan, E. Mousset, E.D. van Hullebusch, D. Huguenot et al, “Remediation of soils contaminated by hydrophobic organic compounds: How to recover extracting agents from soil washing solutions?”, *J. Hazard. Mater.*, vol. 404, Part A, 124137 p., 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124137>.
- [40] Y. Zhang, X. He, G. Zeng, T. Chen, Z. Zhou, H. Wang and W. Lu, “Enhanced photodegradation of pentachlorophenol by single and mixed nonionic and anionic surfactants using graphene-TiO<sub>2</sub> as catalyst”, *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, vol. 22, no. 22, pp. 18211–18220, 2015. doi: 10.1007/s11356-015-4785-z.
- [41] M. Ghanadi, L.P. Padhye, “Revealing the long-term impact of photodegradation and fragmentation on HDPE in the marine environment: Origins of microplastics and dissolved organics” *J. Hazard. Mater.*, vol. 465, 133509 p., 2024.
- [42] Z. Lin, T. Jin, T. Zou, L. Xu, B. Xi, D. Xu et al, “Current progress on plastic/microplastic degradation: Fact influences and mechanism”, *Environm. Pollution*, vol. 304, 119159 p., 2022.
- [43] G. Liu, S. Liao, D. Zhu, J. Cui and W. Zhou, “Solid-phase photocatalytic degradation of polyethylene film with manganese oxide OMS-2”, *Solid st. Sci.*, vol. 13, no. 1, pp. 88–94, 2011.
- [44] S.S. Ali, I.A. Qazi, M. Arshad, Z. Khan, T.C. Voice and C.T. Mehmood, “Photocatalytic degradation of low density polyethylene (LDPE) films using titania nanotubes”, *Environmental nanotechnology, monitoring & management*, vol. 5, pp. 44–53, 2016.
- [45] I. Kovinchuk, N. Haiuk, G. Lazzara, G. Cavallaro, and G. Sokolsky, “Enhanced photocatalytic degradation of PE film by anatase/γ-MnO<sub>2</sub>”, *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 210, 110295 p., 2023.
- [46] T. Matsunaga, R. Tomoda, T. Nakajima and H. Wake, “Photoelectrochemical Sterilization of Microbial-Cells by Semiconductor Powders” *FEMS Microbiology Letters*, vol. 29, pp. 211–214, 1985. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1574-6968.1985.tb00864.x>
- [47] M. Long, J. Wang, H. Zhuang, Y. Zhang, H. Wu and J. Zhang, “Performance and mechanism of standard nano- TiO<sub>2</sub> (P-25) in photocatalytic disinfection of foodborne microorganisms—Salmonella typhimurium and Listeria monocytogenes”, *Food Control*, vol. 39, pp. 68–74, 2014.
- [48] X. Lei, H. Cheng, L. Nie, Y. Xian, and X. Lu, “Plasma-catalytic NO<sub>x</sub> production in a three-level coupled rotating electrodes air plasma combined with nano-sized TiO<sub>2</sub>”, *J of Phys. D: Applied Physics*, vol. 55, no. 11, 115201 p., 2021.
- [49] V. Rodríguez-González, C. Terashima and A. Fujishima, “Applications of photocatalytic titanium dioxide-based nanomaterials in sustainable agriculture”, *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, vol. 40, pp. 49–67, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2019.06.001>.

G.V. Sokolsky

ON POSSIBILITY OF INVOLVING PHOTOCATALYTIC METHODS IN POST-WAR REMEDIATION OF TERRITORIES OF UKRAINE

**Background.** Photocatalytic methods have prospects for use in cleaning and decontamination against organic compounds polluting the territory of Ukraine as a result of military operations – explosives, chemical weapons, fuel and lubricants, pathogens in water and soil; for the degradation of microplastics, etc.

The purpose of the work was to systematize the available data on the possibility of using photocatalytic methods for post-war remediation and restoration of the territories of Ukraine.

**Objective.** This work is dedicated to systematic analysis of the available data on the possibility of photocatalytic methods application in post-war remediation and restoration of the Ukrainian territories.

**Methods.** The state-of-the-art in post-war remediation was investigated together with author experience to evaluate prospectives of advanced oxidation methods, such as photocatalytic ones, in the restoration of ecosystems after war.

**Results.** The ability of photocatalysts based on  $\text{TiO}_2$  to complete mineralization of trinitrotoluene, nerve agents and their model compounds, polyaromatic hydrocarbons, microplastics, and disinfection of pathogens is shown. The perspective of the technology of soil washing by solutions of surfactants and complexones (chelating agents) with subsequent sequential photocatalytic mineralization of organic pollutants and adsorption removal of heavy metals is highlighted. Other data related to the issue of restoration of territories after military operations were discussed. Another noteworthy method - the electro-Fenton process – has been pointed out.

**Conclusions.** Considerable experimental material has been accumulated on the use of photocatalysis and other advanced oxidation processes in laboratory conditions, but practical application is progressing rather slowly. There is a need to solve the problem of economics and energy consumption to create radiation. Nevertheless, such photocatalysts as titanium dioxide and composites based on it have proven their effectiveness in the process of neutralizing explosives and poisonous substances of chemical weapons. Among the conditions of successful application is a relatively low degree of pollution (<2 g/l) of wastewater, therefore the use of photocatalytic methods for the remediation of territories is appropriate at the stages of post-treatment. It is necessary to optimize the support immobilisation. This will help solve the problems of stability and scalability of the technology.

**Keywords:** post-war restoration of territories; photocatalysis;  $\text{TiO}_2$ .

Рекомендована Радою  
хіміко-технологічного факультету  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
25 квітня 2024 року

Прийнята до публікації  
2 жовтня 2024 року



DOI: 0.20535/kpissn.2024.1-4.314408

УДК 544.77.022.84 + 616-06

Л.О. Керносенко<sup>1\*</sup>, Ю.М. Самченко<sup>1</sup>, Н.О. Пасмурцева<sup>1</sup>, О.О. Соловійова<sup>1</sup>, С.М. Дибкова<sup>1</sup>,  
В.О. Шляховенко<sup>2</sup>, І.І. Ганусевич<sup>2</sup>, О.А. Самойленко<sup>2</sup>, П.В. Воротицький<sup>1</sup>, І.І. Волобаєв<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Інститут біоколоїдної хімії імені Ф.Д. Овчаренка НАН України, м. Київ, Україна

<sup>2</sup>Інститут експериментальної патології, онкології і радіобіології  
імені Р.Є. Кавецького НАН України, м. Київ, Україна

\*відповідальний автор: kernosenko@ukr.net

## ГІБРИДНІ ГІДРОГЕЛІ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ТА ЛІКУВАННЯ ОНКОЛОГІЧНИХ ЗАХВОРЮВАНЬ

**Проблематика.** Використання полімерних композитів та гідрогелів, наповнених функціоналізованими наночастинками (зокрема кислотно-модифікованого лапоніту та золота) уможливорює їх застосування для заповнення післяопераційних порожнин, насамперед після резекції пухлин, та дозволяє підвищувати ефективність ранньої діагностики онкологічних захворювань.

**Мета дослідження.** Розробка методів синтезу кислотно-активованого лапоніту, дослідження його основних фізико-хімічних властивостей, методів його інкорпорування до термочутливих гідрогелів; вивчення можливості використання гібридних матеріалів на основі термочутливих гідрогелів та наночастинок золота в онкохірургії.

**Методика реалізації.** Синтезовані матеріали охарактеризовані методами лазерної кореляційної спектроскопії, ІЧ- та УФ-спектроскопії, рентгеноструктурного аналізу, зимографії тощо.

**Результати дослідження.** Синтезовані гібридні полімерні системи на основі термочутливих гідрогелів з наночастинками золота можуть використовуватися для заповнення післяопераційних порожнин з одночасним адресним вивільненням інкорпорованого бактеріостатика Альбуциду. Система додецилсульфат натрія—поліакриламідний гель з інкорпорованими наночастинками кислотно-модифікованого лапоніту продемонструвала високу ефективність під час електрофоретичного розділення білків плазми периферичної крові для ранньої діагностики колоректального раку.

**Висновки.** Кислотна модифікація лапоніту може бути покладена в основу створення нанорозмірних терапевтичних та діагностичних систем. Синтезовані гібридні полімерні матеріали на основі термочутливих гідрогелів з наночастинками золота можуть використовуватися для заповнення післяопераційних порожнин з одночасним адресним вивільненням інкорпорованого бактеріостатичного препарату Альбуциду.

**Ключові слова:** термочутливі гідрогелі; кислотно-модифікований лапоніт; електрофоретичне розділення білків; наночастинки золота; Альбуцид.

### Вступ

Останнім часом інтенсивно розвиваються інноваційні наномедичні підходи до раннього виявлення і персоналізованого лікування раку. Використання інтелектуальних біоматеріалів на основі функціоналізованих наночастинок дозволяє поєднати адресну доставку ліків з їх пролонгованим вивільненням та біодоступністю [1, 2]. Крім того, результати проведених останніми роками досліджень свідчать, що інтелектуальні біоматеріали з пролонгованим ви-

вільненням значно покращують ефективність хіміотерапії і результати лікування онкохворих [3]. В якості таких інтелектуальних біоматеріалів широко використовуються полімерні композити і гідрогелі, наповнені функціоналізованими наночастинками [4, 5]. Просторово зшиті гідрогелі можуть поглинати й утримувати велику кількість води та водних розчинів (зокрема, лікарських препаратів), їх наповнення функціоналізованими наночастинками дозволяє створювати біосумісні та недорогі гібридні біоматеріали з широким спектром застосувань

**Пропозиція для цитування цієї статті:** Л.О. Керносенко, Ю.М. Самченко, Н.О. Пасмурцева, О.О. Соловійова, С.М. Дибкова, В.О. Шляховенко<sup>2</sup>, І.І. Ганусевич, О.А. Самойленко, П.В. Воротицький, І.І. Волобаєв, “Гібридні гідрогелі для діагностики та лікування онкологічних захворювань”, *Наукові вісті КНУ*, № 1–4, с. 81–88, 2024. doi: 10.20535/kpissn.2024.1-4.314408

**Offer a citation for this article:** L.O. Kernosenko, Y.M. Samchenko, N.O. Pasmurtseva, O.O. Soloviova, S.M. Dybkova, V.O. Shlyakhovenko, I.I. Hanusevych, O.A. Samoilenko, P.V. Vorotytskyi, I.I. Volobaiev “Hybrid hydrogels for diagnostics and treatment of cancer”, *KPI Science News*, no. 1–4, pp. 81–88, 2024. doi: 10.20535/kpissn.2024.1-4.314408

у різних галузях медицини та фармації. Використання інтелектуальних біоматеріалів на основі функціоналізованих наночастинок, що характеризуються високою біосумісністю, пористістю, сорбційною здатністю, хімічною і термічною стійкістю, дозволяє поєднати адресну доставку ліків та їх пролонговане вивільнення, зокрема, під час хіміотерапії, та підвищувати ефективність ранньої діагностики онкологічних захворювань. В якості таких інтелектуальних біоматеріалів широко використовуються полімерні композити і гідрогелі, наповнені функціональними наночастинами, зокрема наночастинами лапоніту (Lap®) – синтетичного глинистого мінералу з унікальною анізотропною структурою (диски з діаметром близько 25 нм і завтовшки 1 нм). Він є відносно недорогим і вже має численні технологічні, фармацевтичні та косметичні застосування [6, 7]. Модифікація Lap®, насамперед кислотна активація, надає йому широкий спектр додаткових функціональних властивостей [8], які дозволяють забезпечити адресне транспортування ліків та їх кероване вивільнення, що особливо важливо під час лікування раку, де тривалість впливу ліків на пухлинні клітини має вирішальне значення. Функціональні гідрогелі з інкорпорованими наночастинами лапоніту та його модифікацій є надзвичайно перспективними під час діагностики онкологічних захворювань [9], зокрема колоректального раку (КРР). Відомо, що електрофореграми білків різних біологічних рідин людини (плазма периферичної крові, сеча, спинномозкова рідина та ін.) дозволяють лікарям та біохімікам отримати значну діагностичну інформацію [10]. Результати електрофоретичного поділу ферментів (зимограми) дозволяють вивчати зміни активності та ізоферментного спектра таких білків та дозволяє розділяти різні білки винятково на основі відмінностей у їх молекулярній масі [11, 12]. Для отримання зазначених зимограм широко застосовують метод Леммлі, або диск-електрофорез на основі SDS-PAGE, тобто поліакриламідного гелю (ПААГ) з додаванням додецилсульфата натрію (ДДС) [13]. Дослідження біомаркерів відіграє важливу роль у виявленні та лікуванні пацієнтів з онкологічними захворюваннями. Зауважимо, що плазма периферичної крові людини є найкращим джерелом зразків для ідентифікації біомаркерів [14]. Розділення білків плазми периферичної крові за допомогою електрофорезу є цінним діагностичним інструментом, а також способом моніторингу клінічного прогресу, а покращення поділу білків сприяє збільшенню

інформативності вказаного методу діагностики. Використання запропонованого методу особливо доцільне під час вивчення молекулярної гетерогенності ферментів, що може дати додаткові дані про перебіг та прогноз онкологічних захворювань. Положення ідентифікованих піків електрофоретичної міграції білків певною мірою залежить від концентрації реагентів, що застосовуються для отримання ПААГ, насамперед акриламід (AA) та N,N'-метиленабісакриламід (МБА), пористості гелів [15], а також інкорпорованих сорбентів, зокрема лапоніту та кислотно-активованого лапоніту. Вказане зумовлює актуальність цього дослідження.

Окрім того, гібридні полімерні матеріали на основі термочутливих функціональних гідрогелів з інкорпорованими наночастинами золота, видаються перспективними інноваційними матеріалами для ендопротезування та заповнення післяопераційних порожнин, насамперед після резекції пухлин [16–18].

### Постановка задачі

Метою роботи є розробка методів синтезу кислотно-активованого aLap® (Lap) та дослідження основних фізико-хімічних властивостей суспензій aLap, а також методів їх інкорпорування до гідрогелів на основі AA з метою створення систем для діагностики онкологічних захворювань. Передбачається також дослідити можливість використання гібридних матеріалів на основі термочутливих гідрогелів, наночастинок золота та антимікробного препарату Альбуциду для заповнення та запобігання інфікування післяопераційних порожнин, насамперед після резекції пухлин.

### Матеріали і методи

*Реактиви для синтезу гідрогелів.* N-ізопропілакриламід (НІПА; Merck, 97 %) перекристалізували з гексану і сушили у вакуумі, N,N'-метиленабісакриламід (МБА) (Merck, 98 %); персульфат амонію (ПСА,  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ , Sigma, 98 %); N,N,N',N'-тетраметилендіамін (ТЕМЕД) (Merck, 99 %) Як розчинник у всіх експериментах використовували бідистильовану воду.

У роботі використали сульфатил натрію (альбуцид) – 30 % водний розчин (ПАТ «Фармак», Україна), без додаткового очищення.

Для модифікування Lap® була використана кислотна активація в сірчаній кислоті. Попередньо Lap® диспергували у воді та перемішу-

вали за 60 °С протягом 30 хв. Потім повільно додавали водний розчин кислоти, реакційну суміш перемішували протягом 10 годин за кімнатної температури. Концентрацію аLар у кінцевому розчині фіксували на рівні 4 мас. %, а концентрацію сульфатної кислоти змінювали в межах від 0,5N до 16N. Далі отриманий кислотно-активований лапоніт (аLар) відмивали від залишків непрореагованої кислоти за допомогою промивання протягом трьох днів у дистильованій воді до рН 7,0 (з її багаторазовою заміною) та сушили за 50 °С.

*Синтез гідрогелів на основі ПААГ та кислотнo-модифікованого Лапоніту:* перемішували 3,75 г АА + 0,01 г ЛАП XLS + 0,075 г МБА + 20 мл суміші № 1 (10 г ТРИС + 0,25 г Трилон Б + 175 мл д. в. доводимо до рН 8,9 додаванням 50 %-ної  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ). Суміш перемішували на магнітній мішалці до повного розчинення сухих реагентів протягом 30 хв. Потім розчин диспергували протягом 7 хв (амплітуда 50 %, енергія 10 кДж), на УЗ-диспергаторі Bandelin Sonopuls UW 100 (Німеччина), барботували аргон протягом 2 хв, додавали суміш (0,5 г ПСА + 4,5 г  $\text{H}_2\text{O}$ ) та суміш (0,5 г ТЕМЕД + 4,5 г  $\text{H}_2\text{O}$ ) після чого швидко заливали суміш у спеціально виготовлений скляний шаблон зі спейсерами завтовшки 1 мм.

*Синтез наночастинок золота.* Сферичні наночастинок золота з середнім розміром 30 нм синтезували методом гідротермального синтезу: відновлення золотохлористоводневої кислоти ( $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) ( $\geq 99,9$  % trace metals basis, Sigma-Aldrich) цитратом натрію за наявності карбонату калію проводили за температури 121 °С, тиску 1,04 атм протягом 15 хв. Вихідна концентрація  $C_{\text{Au}} = 38,6$  мкг/мл за металом.

*Синтез гідрогелів та інкорпорування наночастинок золота до їх складу.* Гідрогелі на основі НІПА були синтезовані за допомогою радикальної полімеризації водного розчину мономеру за 10 °С і ковалентно-зшиті біфункціональним мономером МБА. Для ініціювання полімеризації використовували окисно-відновну систему на основі ПСА і ТЕМЕД. Синтез гідрогелів проводили таким чином. Барботували аргон через реакційну суміш (водний розчин суміші мономеру і зшиваючого агента) перед додаванням окислювально-відновлювальної системи. Після змішування компонентів композицію ретельно перемішували і переносили у форму, що складається з двох паралельних скляних пластин, розділених спейсерами завтовшки 1 мм і витримували протягом 1 години за кімнатної температури. Для інкорпорування наночастинок золота

розраховану кількість суспензії з концентрацією  $C_{\text{Au}} = 38,6$  мкг/мл за металом додавали до гелеутворюючої композиції під час інтенсивного перемішування (перед перенесенням до скляних форм). Приблизно через чотири години гідрогелі виймали з форм і інтенсивно промивали дистильованою водою за кімнатної температури для видалення непрореагованих залишків. Воду міняли 2 рази на день, а процес відмивання контролювали за допомогою УФ-спектрометра (SPECORD M40, Carl Zeiss, Germany). Гелеві зразки у вигляді дисків вирізали з набухлих гідрогелевих плівок за допомогою пробійника ( $d = 10$  мм) і висушували до постійної маси за 25 °С. Детальний склад синтезованих гідрогелів наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Склад гідрогелів на основі НІПА

Компонент	Вміст, % мас. у зразку			
	1	2	3	4
НІПА	20,8	20,8	20,8	20,8
МБА	0,1	0,1	0,1	0,1
ПСА	0,5	0,5	0,5	0,5
ТЕМЕД	0,5	0,5	0,5	0,5
Дистильована вода	78,1	78,1	78,1	78,1
Наночастинок золота, мкг/г	–	4,02	8,04	12,06

*Приготування фракції плазми.* У дослідженні взяли участь донори та хворі на КРР, які перебували у відділенні пухлин печінки, підшлункової залози та онкоvasкулярної хірургії Національного інституту раку МОЗ України (м. Київ, Україна) у 2020–2022 роках. Зразки крові були отримані у первинних хворих на КРР перед початком лікування. Усі пацієнти дали інформовану згоду на участь у дослідженні та використання їх біологічних матеріалів у дослідницьких цілях. Дозвіл на проведення дослідження було отримано від Центральної комісії з біоетики МЗ України і локальної комісії з біоетики Національного інституту раку). Для визначення протеому плазми периферичної крові приблизно 6–9 мл її збирали в пробірку (VACUTEST KIMA, Італія), що містить 16,2 мг антикоагулянту (калієва сіль етилендіамінтетраацетата ( $\text{K}_2\text{EDTA}$ )). Досліджувані зразки крові (10 мкл) змішували зі 100 мкл охолодженого (4 °С) 0,14 М розчину хлориду натрію і поміщали у пробірки 1,5 мл («Еппендорф»). Суміш ретельно перемішували і центрифугували за 5000 об/хв протягом 5 хв. До супернатанту додавали 500 мкл охолодженого ацетону, після чого суміш поміщали у морозильну

камеру за  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  на 10 хв, потім центрифугували за 5000 г 5 хв. Отриманий осад розчиняли у 100 мкл 2 % ДДС, що містив 10 % гліцерину і 0,005 % бромфенолового синього. Проби прогрівали за  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  протягом 2 хв. Підготовлені таким чином проби вносили у лунки ПААГ.

*ІЧ-аналіз* проводили на Фур'є-спектрометрі Shimadzu IRAffinity-1S з використанням детектора порушеного повного внутрішнього відбиття Specac Quest ATR у діапазоні  $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ , при накопиченні 25–40 сканувань, з роздільною здатністю  $4\text{ cm}^{-1}$  й опрацьовували за допомогою програми обробки даних LabSolutions IR Ver. 2.26.

*Рентгенограми* високодисперсних кислотно-активованих суспензій лапоніту досліджували на рентгенівському дифрактометрі (ДРОН-УМ1) з двома щілинами Соллера із фільтруванням  $\text{Co-K}\alpha$ -випромінюванням. Ідентифікацію мінерального складу об'єктів здійснювали відповідно до картотеки ASTM.

Для *вимірювання розміру наночастинок* та їх розподілу за розмірами використовувався метод динамічного світлорозсіювання (ДСР). Вимірювання проводили на дзета-сайзері типу NanoS (Malvern).

*Рівноважний ступінь набухання* гідрогелів у дистильованій воді,  $W$ , розраховували за формулою  $W = (m_s - m_d)/m_d$ , де  $m_s$  – маса набухлого гідрогелю в рівноважному стані після 24 годин набухання, а  $m_d$  – маса повністю висушеного ксерогелю після упарювання води. Зразки гідрогелю інкубували в термостаті TC-1/80 SPN та зважували з точністю до  $10^{-4}$  г на аналітичних вагах AXIS (Польща). Дані подані як середнє значення  $\pm$  стандартне відхилення трьох–п'яти незалежних експериментів. Для статистичної обробки даних використовували ANOVA, достовірним вважали  $p < 0,05$ .

*Введення Альбуциду та його вивільнення.* Насичення гідрогелів Альбуцидом проводили таким чином. Наважку гідрогелю поміщали в розчин Альбуциду з концентрацією 30 % і витримували для насичення протягом 24 годин за температури  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , після чого поміщали в 10 мл дистильованої води. Через певні проміжки часу гідрогель видаляли, розчинник аналізували спектрометрично за допомогою УФ-спектрометра (SPECORD M40, Carl Zeiss, Germany), вимірюючи оптичну густину сигналу Альбуциду за 260 нм. Гідрогель знову поміщали в 10 мл дистильованої води і витримували протягом певного періоду часу. Цю процедуру повторювали протягом усього експерименту.

*Електрофорез* проводили в 15 % ПААГ з використанням вертикальної електрофоретичної буферної системи SDS-PAGE з розміщенням гелю між двома скляними пластинами (45475 мм, з товщиною спейсерів 1 мм і гребінцем з 8 зубцями). Отримані зразки плазми периферичної крові донорів та хворих на КРР для завантаження на гель розчиняли в 0,4 М Трис-НСІ (рН 6,8) буфері, що містив гліцерин (5 %), ДДС (0,1 %) і бромфеноловий синій (0,001 %). Використовувався електродний буфер (водна суміш гліцерину (1,4 %), Трис (0,46 М) і ДДС (0,1 %)). Прикладена напруга становила 100 В. Типовий час розділення становив приблизно 3,5 години. Гель фіксували за допомогою водного фіксуючого розчину (40 % етанол, 10 % оцтова кислота) протягом 16 годин. Для візуалізації білків, розділених за допомогою ДДС–ПААГ, застосовували забарвлювання гелів протягом 60 хв у розчині 0,1 % Coomassie Brilliant Blue R-250 [19]. Нарешті, гель знебарвлювали у фіксуючому розчині протягом 90 хв.

## Результати та їх обговорення

Механізм кислотної активації полягає у проникненні протонів у глибину лапонітних шарів з подальшою атакою структурних гідроксильних груп. Модифікація структури Lap® дозволяє тонко регулювати різноманітні властивості лапонітних дисків, такі як їх дисперсність, поверхневий заряд, колоїдну стабільність і спорідненість до біомолекул (рис. 1).

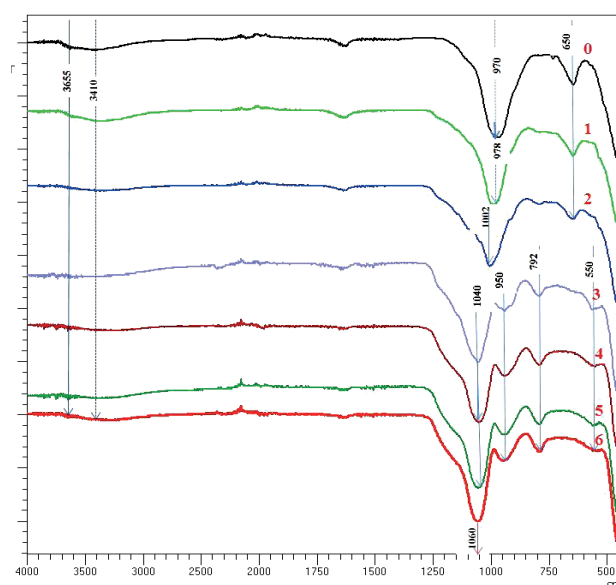


Рис. 1. ІЧ-спектри зразків: 0 – Lap®; 1 – aLap (0,5N)  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ; 2 – aLap (1N)  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ; 3 – aLap (2N)  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ; 4 – aLap (4N)  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ; 5 – aLap (8N)  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ; 6 – aLap (16N)  $\text{H}_2\text{SO}_4$



Водночас надмірна кислотна активація може також призвести до руйнування кристалічної структури Lap® та утворення аморфних фаз кремнезему  $nSiO_2 \times mH_2O$ . Вказані процеси було проаналізовано з використанням методів ІЧ-спектроскопії та рентгено-структурного аналізу. Як видно з ІЧ-спектрів зразків нативного та кислотного-активованого лапоніту (рис. 1), цей процес являє собою кислотну активацію зі збереженням структури лапоніту під час обробки сульфатною кислотою з концентрацією від 0,5N до 2N, причому механізм вказаного процесу зумовлений накопиченням негативного заряду на наночастинках Lap® за рахунок вимивання компенсуючих позитивно заряджених катіонів лужноземельних металів. Проаналізуємо спочатку незруйновану структуру Lap® та aLap. Низькоінтенсивні смуги близько  $1630\text{ cm}^{-1}$  зумовлені сорбованою водою, смуги  $950\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$  відповідають асиметричним валентним коливанням  $-Si-OH-$  та  $-Si-O-Si-$ , а смуга за приблизно  $650\text{ cm}^{-1}$  відповідає деформаційним коливанням  $Mg_3OH$ , причому інтенсивність цієї смуги зменшується по мірі зростання інтенсивності кислотної активації (у разі збільшення концентрації сульфатної кислоти від 0,5N до 2N). Смуга з інтенсивним максимумом за  $1045\text{--}1055\text{ cm}^{-1}$  для зразків aLap, отриманих під час оброблення сульфатною кислотою з концентрацією від 2N та вище, можна пояснити позаплощинними (перпендикулярними до шарів глинистого мінералу) валентними коливаннями  $-Si-O-$ . У разі зростання концентрації кислоти, що використовувалася для кислотної активації нативного лапоніту, спостерігається суттєве вилугування активних компонентів лапоніту, на що вказує поява смуги близько  $790\text{ cm}^{-1}$ , зумовленої симетричними валентними коливання-

ми  $-Si-O-Si-$  аморфного кремнезему в деструктурованому лапоніті [20].

Отримані спектральні дані корелюють з результатами рентгено-структурного аналізу, згідно з якими кислотна активація у разі великих концентрацій кислоти призводить до появи широкого піку за  $23^\circ$ , характерного для аморфного кремнезему (рис. 2a).

Аналіз розмірів наночастинок виявив підвищену агрегацію частинок aLap у водних суспензіях. Середній розмір нативного Lap® становить близько 20 нм, що відповідає орієнтовно усередненим розмірам дисків Lap діаметром приблизно 25 нм і завтовшки приблизно 1 нм. Навіть для найменшого ступеня кислотної активації середній розмір частинок збільшується приблизно на порядок (рис. 2б).

На основі електрофоретичної системи (ПААГ-ДДС), зокрема з інкорпорованими наночастинками Лапоніту та кислотного-модифікованого Лапоніту, було проведено розділення білків плазми периферичної крові донорів та хворих на КРР (рис. 3).

Отримані результати продемонстрували відмінність протеому плазми периферичної крові донора та хворих на КРР з метастазами та без метастазів. У процесі диск-електрофорезу білки плазми периферичної крові поділяються на фракції – альбуміни та глобуліни (альфа-1-глобуліни, альфа-2-глобуліни, бета-глобуліни та гама-глобуліни). Як видно з електрофореграм (рис. 3), найкращий поділ глобулінової фракції у донора відбувся в гелі з кЛап. В електрофореграмі з кЛап у донора фракція глобулінів містить 4 білки порівняно з електрофореграмою без кЛап, де фракція глобулінів містить тільки 2 білки. У хворих на КРР глобулінова фракція не проявлялася.

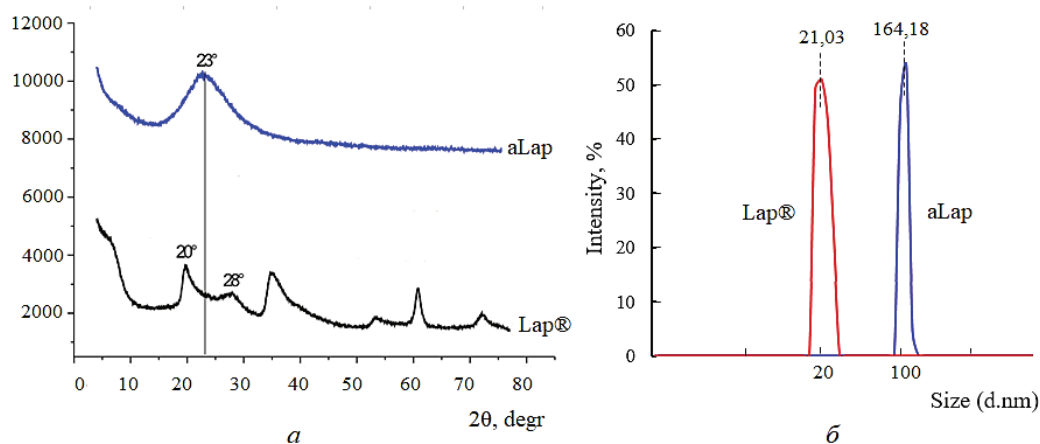


Рис. 2. Дифрактограми (а) та розподіл за розміром наночастинок (б) вихідного Lap® та модифікованого aLap



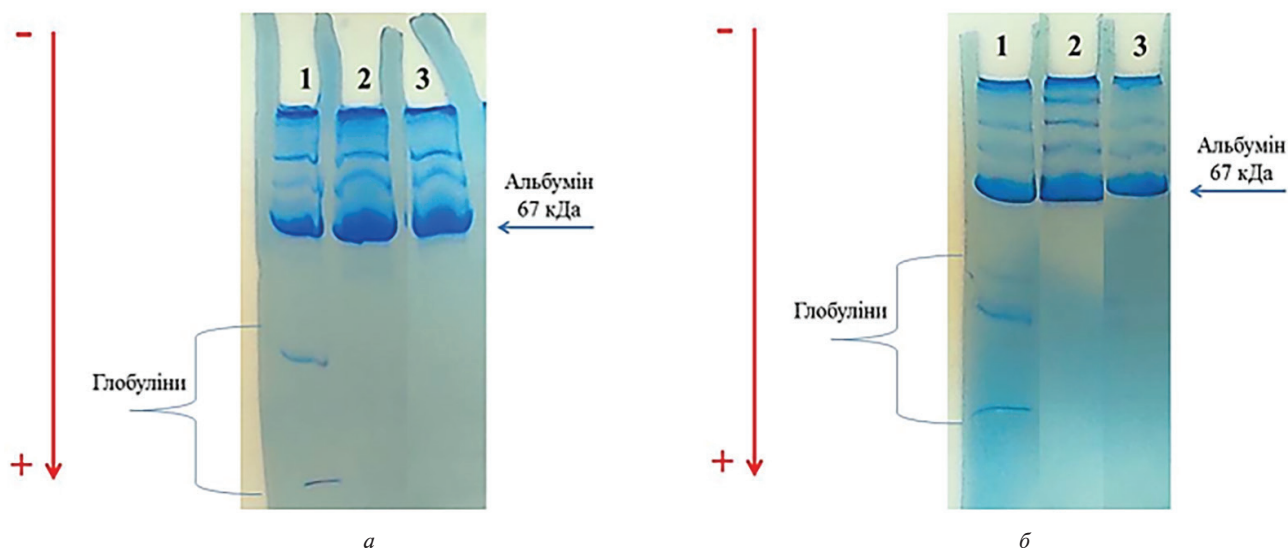


Рис. 3. 1-D електрофорез білків плазми периферичної крові донора (1-й трек) та хворих на КРР без метастазів (2-й трек) та з метастазами (3-й трек) у 15 % ПААГ без застосування лапоніту (*a*) та із застосуванням наночастинок кислотно-активованого лапоніту – 2N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (*b*); (вертикальна стрілка показує напрямок електрофоретичної міграції – від катоду до аноду)

Наразі розглянемо фізико-хімічні властивості гібридних полімерних систем на основі термочутливих гідрогелів з інкорпорованими наночастинами золота. Температурна залежність набухання гідрогелів на основі НІПА відзначається переходом з набухлого до сколапсованого стану під час нагрівання вище температури нижньої критичної температури розчинення (НКТР)), що складає для НІПА близько 32 °С. Максимальний ступінь набухання спостерігався

за низьких температур (10–15 °С) з подальшим різким зменшенням нижче НКТР. Вказаний ефект істотно впливає на дифузійні властивості синтезованих гідрогелів та на можливість контролю за вивільненням лікарських сполук з них. Зауважимо, що суттєвих відмінностей, зумовлених інкорпоруванням наночастинок золота, не спостерігалось (рис. 4*a*).

Проаналізуємо дифузію Альбуміну із синтезованих нанокомпозитів. Зі зростанням вмісту

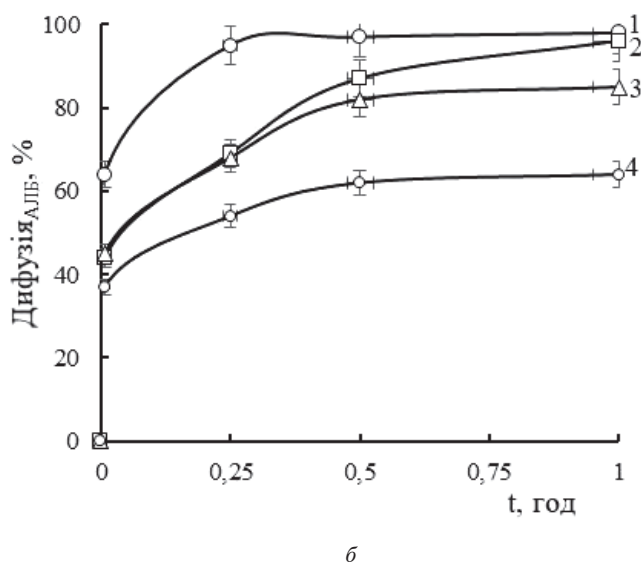
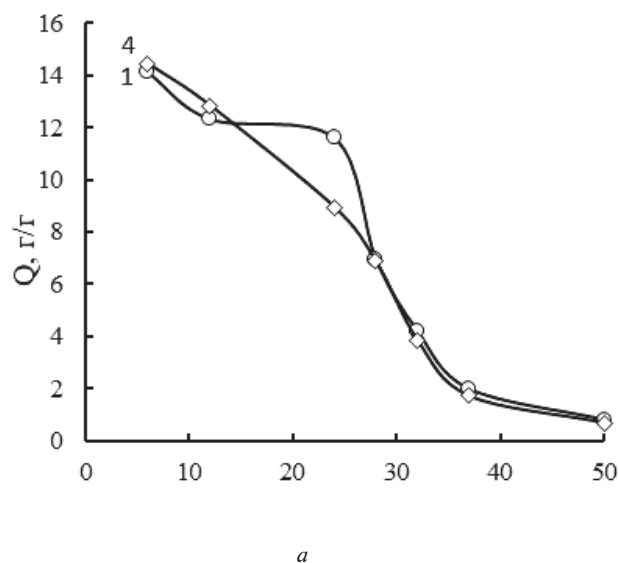


Рис. 4. Температурна залежність ступеня набухання гідрогелів (*a*) та кінетика вивільнення Альбуміну з гідрогелів на основі НІПА (*b*) з різним вмістом наночастинок золота (мкг/г): 1 – C<sub>Au</sub> = 0; 2 – C<sub>Au</sub> = 4,02; 3 – C<sub>Au</sub> = 8,04; 4 – C<sub>Au</sub> = 12,06)

наночастинок золота у гідрогелях вивільнення Альбуциду суттєво уповільнюється (рис. 4б), що може пояснюватися взаємодією золота з наявними у молекулі лікарського препарату аміногрупами, а саме з неподіленою електронною парою атома азоту на 2s-рівні [21]. Зазначимо високу швидкість вивільнення альбуциду з усіх синтезованих гідрогелів – протягом перших 15 хв. вивільнилася більша частина сорбованого препарату (залежно від складу – від 55 % до 95 %). Однак, враховуючи механізм дії зазначеного антимікробного бактеріостатичного засобу, його активне вивільнення на початковому етапі є бажаним, оскільки призводить до дезінфекції операційного поля та запобігає його вторинному інфікуванню. Зауважимо, що отримані результати корелюють з продемонстрованим раніше антимікробним ефектом розроблених гібридних гідрогелів [22].

### Висновки

Кислотна модифікація лапоніту може бути покладена в основу подальшого створення су-

часних нанорозмірних діагностичних систем, насамперед для ранньої діагностики онкологічних захворювань. Так, система ПААГ–ДДС продемонструвала високу ефективність під час електрофоретичного розділення білків плазми периферичної крові донорів та хворих на КРР, особливо у випадку інкорпорування до електрофоретичної системи кислотно-модифікованого лапоніту.

Показано, що синтезовані гібридні полімерні системи на основі термочутливих гідрогелів з інкорпорованими наночастинками золота, на думку авторів, можуть використовуватися для заповнення післяопераційних порожнин, зокрема після резекції пухлин, і знезараження операційного поля внаслідок адресного вивільнення інкорпорованого бактеріостатичного препарату Альбуциду.

Автори висловлюють подяку Національному фонду досліджень України за фінансову підтримку, надану за проектами: № 2022.01/0039 та № 2021.01/0178, а також ТОВ «Троліт».

### References

- [1] J. Basso, A. Miranda, S. Nunes, T. Cova, J. Sousa, C. Vitorino and A. Pais “Hydrogel-Based Drug Delivery Nanosystems for the Treatment of Brain Tumors”, *Gels*, vol. 4 (3), 2018. doi: 10.3390/gels4030062.
- [2] O. Goncharuk, Yu. Samchenko, D. Sternik, L. Kernosenko, T. Poltoratska, N. Pasmurtseva, M. Abramov, E. Pakhlov and A. Derylo-Marczewska, “Thermosensitive hydrogel nanocomposites with magnetic laponite”, *Appl Nanosci*, vol. 10 (12), 2020, 4559 p. doi: 10.1007/s13204-020.
- [3] R.V. Kalaydina, K. Bajwa, B. Qorri, A. Decarlo and M. R Szewczuk, “Recent advances in “smart” delivery systems for extended drug release in cancer therapy” *Dove Medical Press – Open Access Publisher of Medical research*, vol. 2018:13, 2018, pp. 4727–4745. doi: 10.2147/IJN.S168053.
- [4] S. Kalia, “Polymeric Hydrogels as Smart Biomaterials Springer”, Series on Polymer and Composite Materials (SSPCM), Springer, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-25322-0.
- [5] T. Raj Singh, G. Laverty and R. Donnelly “Hydrogels: Design, Synthesis and Application in Drug Delivery and Regenerative Medicine”, CRC Press, Taylor and Francis Group, LLC, 2017, 352 p. doi: 10.1201/9781315152226.
- [6] A. Das, R. Uppaluri and Ch. Das, “Feasibility of poly-vinyl alcohol/starch/glycerol/citric acid composite films for wound dressing applications”, *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 131, 2019, pp. 998–1007. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.03.160.
- [7] O. Samoylenko, O. Korotych, M. Manilo et al., “Biomedical Applications of Laponite®-based Nanomaterials and Formulations: Soft Matter Systems for Biomedical” Chapter 15. Applications, Edited by L. Bulavin, N. Lebovka. Springer Proceedings in Physics, Cham, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-80924-9\_15.
- [8] N. Lebovka, O. Goncharuk, V. Klepko, V. Mykhailyk, Yu. Samchenko, L. Kernosenko, N. Pasmurtseva, T. Poltoratska, O. Siryk, O. Solovieva and M. Tatochenko, “Cross-Linked Hydrogels Based on PolyNIPAAm and Acid-Activated Laponite RD: Swelling and Tunable Thermosensitivity”, *Langmuir*, 2022, vol. 38 (18), pp. 5708–5716. doi: 10.1021/acs.langmuir.2c00310.
- [9] M. Sepantafar, R. Maheronnaghsh, H. Mohammadi, S. Rajabi-Zeleti, N. Annabi, N. Aghdami and H. Baharvand, “Stem cells and injectable hydrogels: synergistic therapeutics in myocardial repair”, *Biotechnol. Adv.*, vol. 34, 2016, pp. 362–379. doi: 10.3390/membranes7040056.
- [10] A. Wuethrich, J. P. Quirino, “A decade of microchip electrophoresis for clinical diagnostics – a review of 2008–2017”, *Analytica chimica acta* vol. 1045, pp. 42–66. doi: 10.1016/j.aca.2018.08.009.
- [11] T. Aoki, “A comprehensive review of our current understanding of red blood cell (RBC) glycoproteins”, *Membranes*, vol. 7 (4), 2017, pp. 56. <https://doi.org/10.3390/membranes7040056>.

- [12] U. K. Laemmli, “Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4”, *Nature*, vol. 227(5259), 1970 pp. 680–685. doi: 10.1038/227680a0.
- [13] <https://en.wikipedia.org/wiki/SDS-PAGE>.
- [14] G. Shu, W. Zhu, Y.Z. Jiang, X. W. Li, et al. “Persistent luminescence immune hydrogel for photodynamic-immunotherapy of tumors *in vivo*”, *Adv. Funct. Mater.*, vol. 31 (36), 2021, 2104472 p. doi:10.1002/adfm.202104472.
- [15] B. Abel, C. Luch, et al “Effect of immunology biomarkers associated with hip fracture and fracture risk in older adults”, *Immunity & Ageing*, vol. 20, 2023, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1186/s12979-023-00379-z>.
- [16] A.P. Maletskyi, Y.M. Samchenko, V.V. Vit, N. M. Bigun and L.O. Kernosenko, “The nature of the reaction of the soft tissues of the orbit, auricle and bone structures to the implantation of a hybrid gel in the experiment”, *Archive of Ophthalmology (Ukraine)*, vol. 6, 2 (11), 2018, pp. 20–27.
- [17] Yu.M. Samchenko, A.P. Maletskyi, N.M. Bigun, G.A. Dolynskyy, L.O. Kernosenko, N. O. Pasmurtseva, T. P. Poltoratska and I. Ie. “Mamyshev, Dynamics of depositing and diffusion of drugs (chlorhexidine, 5-fluorouracil and doxorubicin) in hydrogel implants with different hydrogel crosslinking densities”, *Journal of Ophthalmology (Ukraine)*, vol. 3 (494), 2020, pp. 53–60.
- [18] A. Maletskyi, Yu. Samchenko and N. Bigun, “Improving the Antitumor Effect of Doxorubicin in the Treatment of Eyeball and Orbital Tumors”, *In Advances in Precision Medicine Oncology*, edited by H. Arnouk, B. Hassan, London: IntechOpen, 2021. 10.5772/intechopen.95080.
- [19] Ju. Brunelle, R. Green, “Coomassie blue staining”, *In Methods in enzymology*, Elsevier, vol. 541, 2014, pp. 161–167. doi: 10.1016/B978-0-12-420119-4.00013-6.
- [20] J.A. Santana Costa and C.M. “Paranhos Systematic Evaluation of Amorphous Silica Production from Rice Husk Ashes”, *J. Cleaner Prod.*, vol. 192, 2018, pp. 688–697. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.028>.
- [21] Y. Lyu, L. M. Becerril, M. Vanzan, S. Corni, et al, “The Interaction of Amines with Gold Nanoparticles”, *Adv Mater*, Online Version of Record before inclusion in an issue, Mar 23, 2023. doi: 10.1002/adma.202211624.
- [22] Yu. M. Samchenko, S. M. Dybkova, A. P. Maletskyi, L. O. Kernosenko, T. G. Gruzina, et al., “Antimicrobial effects of hydrogel implants incorporating gold nanoparticles and albucide and developed for reconstructive surgery in the orbit and periorbital area” *Journal of Ophthalmology*, vol. 5 (514), 2023, pp. 27–33.

L.O. Kernosenko, Y.M. Samchenko, N.O. Pasmurtseva, O.O. Soloviova, S.M. Dybkova, V.O. Shlyakhovenko, I.I. Hanusevych, O.A. Samoilenko, P.V. Vorotytskyi, I.I. Volobaiev

#### HYBRID HYDROGELS FOR DIAGNOSTICS AND TREATMENT OF CANCER

**Background.** Application of polymer composites and hydrogels filled with functionalized nanoparticles (in particular, acid-modified laponite and gold) allows their use for filling postoperative cavities, especially after tumour resection, and enhances the effectiveness of early cancer diagnosis.

**Objective.** The purpose of the paper is to develop methods for the synthesis of acid-activated laponite, study its basic physicochemical properties, methods of its incorporation into thermosensitive hydrogels; studying the possibility of using hybrid materials based on thermosensitive hydrogels and gold nanoparticles in oncological surgery.

**Methods.** The synthesized materials were characterized using laser correlation spectroscopy, IR and UV spectroscopy, X-ray diffraction analysis, zymography, etc.

**Results.** Synthesized hybrid polymer systems based on thermosensitive hydrogels with gold nanoparticles can be used to fill postoperative cavities with simultaneous targeted release of the incorporated Albucid as a bacteriostatic. The sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel system with incorporated nanoparticles of acid-modified laponite demonstrated high efficiency in the electrophoretic separation of peripheral blood plasma proteins for the early diagnosis of colorectal cancer.

**Conclusions.** Acid modification of laponite can serve as a basis for the development of nanoscale therapeutic and diagnostic systems. Synthesized hybrid polymeric materials based on thermosensitive hydrogels and gold nanoparticles can be used to fill postoperative cavities with a simultaneous targeted release of the incorporated bacteriostatic drug Albucid.

**Keywords:** thermosensitive hydrogels; acid-modified laponite; electrophoretic separation of proteins; gold nanoparticles; Albucid.

Рекомендована Радою  
хіміко технологічного факультету  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
22 листопада 2023 року

Прийнята до публікації  
15 травня 2024 року

---

**АВТОРИ НОМЕРА**

**Бідюк Петро Іванович**  
ORCID: 0000-0002-7421-3565

**Волобаєв Ігор Ігорович**  
ORCID: 0000-0002-4158-8256

**Воротицький Павло Володимирович**  
ORCID: 0009-0005-2250-7798

**Ганусевич Ірина Іванівна**  
ORCID: 0000-0002-8597-1935

**Данилов Валерій Якович**  
ORCID: 0000-0003-3389-3661

**Дибкова Світлана Миколаївна**  
ORCID: 0000-0002-8580-2584

**Ільченко Михайло Юхимович**  
ORCID: 0000-0002-3459-4949

**Капштик Сергій Володимирович**  
ORCID: 0000-0002-3509-8015

**Керносенко Людмила Олександрівна**  
ORCID: 0000-0001-6463-9098

**Миронець Аліна Володимирівна**  
ORCID: 0009-0003-2206-7505

**Наритник Теодор Миколайович**  
ORCID: 0000-0001-8071-6356

**Нестерук Ігор Георгійович**  
ORCID: 0000-0001-7250-2729

**Нікітін Владислав Олегович**  
ORCID: 0009-0001-9921-0213

**Пасмурцева Наталія Олексіївна**  
ORCID: 0000-0002-1403-0513

**Савастьянов Володимир Володимирович**  
ORCID: 0000-0002-2052-0420

**Самойленко Олена Анатоліївна**  
ORCID: 0000-0003-1094-9861

**Самченко Юрій Маркович**  
ORCID: 0000-0001-6463-9098

**Сокольський Георгій Володимирович**  
ORCID: 0000-0002-2082-5806

**Соловійова Олена Олександрівна**  
ORCID: 0000-0002-3896-2606

**Стеценко Олександр Олександрович**  
ORCID: 0009-0005-9839-6166

**Столяр Михайло Володимирович**  
ORCID: 0009-0009-3624-3147

**Терещенко Іван Миколайович**  
ORCID: 0000-0003-0823-7507

**Тертичний Роман Віталійович**  
ORCID: 0009-0007-1536-6602

**Чупрін Денис Станіславович**  
ORCID: 0009-0009-9011-8443

**Шляховенко Володимир Олексійович**  
ORCID: 0000-0002-5953-191X

