

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ



# **ВІСНИК**

**Східноукраїнського  
національного університету  
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

**№ 3 (279)  
2023**

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Київ 2023







DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2023-279-3-5-10>

УДК: 004.4'27

## РОЗРОБКА МОБІЛЬНОГО ДОДАТКУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ АВТЕНТИЧНОСТІ МЕДІА ФАЙЛУ

Деркач М.В., Остополець В.Ю., Дерев'янченко В.С.

### DEVELOPMENT OF MOBILE APPLICATION FOR DETERMINING AUTHENTICITY OF MEDIA FILE

Derkach M.V., Ostopolets V.Yu, Derevyanchenko V.S.

У статті розглянута задача розробки мобільного додатку для збору, аналізу та візуалізації геоданих з файлів мультимедіа для вирішення проблеми з ідентифікацією та автентичністю медіа матеріалів, оскільки існуючі рішення не використовують групу тегів під назвою "розширення" файлів стандартного формату GPX, тобто додаткові дані, отримані з датчиків мобільних пристроїв, включаючи шляхові точки, треки та маршрути. На відміну від них розроблений мобільний додаток дозволяє порівняти дані з датчиків у медіа файлах з даними визначеної місцевості, тим самим ідентифікувати та встановити автентичність або фальсифікацію файлу. Останнім часом це набуває все більшої особливої актуальності, так як завдяки медіа матеріалам можна достеменно довести чи були проведені будь-які маніпуляції з файлом, що підтверджує або спростовує справжність подій в різних сферах життя, навіть у юридичній та аналітичній сферах. Також мобільний додаток дозволяє створювати відео файли, що зберігаються у локальному сховищі пристрою разом з файлами GPX та CSV, що мають дані, отримані під час зйомки з поширених датчиків та сервісів, вбудованих на багатьох сучасних мобільних пристроях. Розроблений мобільний додаток дозволяє візуалізувати геодані у Google Map, а дані з сенсорів (акселерометру, гіроскопу, геомагнітного датчику) відображати на панелі відео програвача разом з розрахованим кутом нахилу пристрою та відстані до об'єкту завдяки тригонометричним формулам. Під час реалізації мобільного додатку були використані такі засоби, як середовище для розробки – Android Studio Giraffe, мова програмування під системою Android, відомого розробника JetBrains – Kotlin, бібліотека для реалізації патерна програмування Dependency Injection – Hilt, бібліотека для візуалізації геопозиції користувача на mapі – Google

Maps, відео програвач для системи Android – Exo Player. Мобільний додаток має простий та інтуїтивний інтерфейс, підтримується операційною системою Android 5.0 та вище (тобто підтримується на 99% усіх Android-пристроях), невибагливий до ресурсів, має гнучку та модульну архітектуру Google Android App Architecture.

**Ключові слова:** автентичність, геодані, датчик, медіа файл, мобільний додаток.

**Вступ.** Мультимедійні дані такі, як відео, фото та аудіо стали важливими джерелами інформації в різних сферах життя, а їхнє використання в судових справах набуло особливої актуальності, оскільки завдяки медіа матеріалам можна точно та недвозначно довести обставини подій та справжність фактів. Однак виникають проблеми з ідентифікацією та автентичністю медіа матеріалів. Для вирішення цієї проблеми можна використовувати дані з датчиків та сервісів, що вбудовані в багатьох сучасних мобільних пристроях, такі як гіроскоп, акселерометр, геопозиція, сенсор геомагнітного поля тощо, а саме достатньо порівняти дані з сенсорів у медіа файлах з даними визначеної місцевості, й в разі виявлення змін, вважати їх сфальсифікованими.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існує декілька програмних продуктів на різних платформах для подібних цілей [1,2]. Додатки записують мультимедійні файли разом з маршрутами та треками у форматі GPX. Файл GPX — це стандартний формат, що використовують більшість пристроїв GPS [3,4], а також багато

різних програм і вебслужб для обміну даними про місцезнаходження з іншими пристроями GPS, картографування, створення маршрутів, шляхових точок і геокешингу [5,6].

Але всі ці додатки не використовують розширення файлів GPX, тобто додаткові дані, отримані з сенсорів мобільних пристроїв [7], специфічні для пристрою GPS або виробника, які потрібно теж зберігати між тегами `<extension>` і `</extension>` для однозначного визначення автентичності медіа файлу.

**Мета статті.** Розробити мобільний додаток для збору, аналізу та візуалізації геоданих з медіа файлів, завдяки використовуваним датчикам пристрою, що дозволяє ідентифікувати місцезнаходження об'єкту та визначити сфальсифіковані медіа.

**Основний зміст роботи.** В результаті був реалізований мобільний додаток на мові Kotlin для платформи Android, побудований за принципами архітектури Google Android App Architecture у середовищі розробки Android Studio Giraffe.

Платформа Android підтримує та виділяє три широкі категорії датчиків (табл.).

**Датчики руху.** Ці датчики вимірюють сили прискорення та сили обертання вздовж трьох осей. Ця категорія включає акселерометри, датчики гравітації, гіроскопи та датчики вектору обертання.

**Датчики положення.** Ці датчики вимірюють фізичне положення пристрою. До цієї категорії відносяться датчики орієнтації та магнітometri.

**Екологічні датчики.** Ці датчики вимірюють різні параметри навколишнього середовища, такі як температура й тиск навколишнього повітря, освітленість і вологість. До цієї категорії відносяться барометри, фотометри та термометри.

Деякі сучасні смартфони на платформі Android також обладнані датчиками, що визначають відстань від камери до об'єктів. Одним із найпоширеніших типів датчиків для цієї мети є Time-of-Flight (ToF) датчики, що вимірюють час, який потрібен для того, щоб світло або інфрачервоні сигнали відправлені з пристрою, відбилися від об'єкта і повернулися назад. Це дозволяє отримати точні виміри відстані. Вразі, якщо мобільний пристрій не має ToF датчиків, достатньо лише розраховувати кут нахилу смартфона за допомогою поширених сенсорів - акселерометру та гіроскопу, вбудованих у пристрій.

Таблиця

**Датчики перших двох категорій, що підтримуються платформою Android**

Датчик	Тип	Опис	Загальні випадки використання
TYPE_ACCELEROMETER	Апаратний	Вимірює прискорення сили в м/с <sup>2</sup>	Виявлення руху (тремтіння, нахил і т.п.)
TYPE_GRAVITY	Програмний	Вимірювання сили тяжіння в м/с <sup>2</sup>	Виявлення руху (тремтіння, нахил і т.п.)
TYPE_GYROSCOPE	Апаратний	Швидкість обертання пристрою в рад.	Виявлення обертання (поворот і т.п.)
TYPE_LINEAR_ACCELERATION	Програмний	Вимірює прискорення сили в м/с <sup>2</sup>	Моніторинг прискорення уздовж однієї осі
TYPE_MAGNETIC_FIELD	Апаратний	Геомагнітне поле в мкТл	Створення компаса
TYPE_ORIENTATION	Програмний	Міра градусів обертання, що робить пристрій навколо трьох осей	Визначення місцезнаходження пристрою
TYPE_PROXIMITY	Апаратний	Міра близькості об'єкта в см	Позиція телефону під час розмови
TYPE_ROTATION_VECTOR	Програмний	Міра орієнтації пристрою, трьох елементів вектору обертання пристрою	Детектор руху та виявлення обертання

Такий метод підходить для розрахунку відстані до об'єктів за допомогою камери пристрою у реальному часі або вже з існуючої фотографії/відео. Для розрахунку доцільніше використовувати формули тригонометрії, замість паралаксу, формул гаверсінуса або Вінсенті, тому що відстань не така велика та й вимірювання повинне проходити у площині, а не у сфері.

На рисунку 1 видно, що висота знаходження смартфона від поверхні та відстань до об'єкту складають кут  $90^\circ$ , тобто висота та відстань є катетами прямокутного трикутника. З вхідних та доступних даних за допомогою мобільного пристрою можна визначити кут  $\theta$  нахилу пристрою відповідно площині, що знаходиться перпендикулярно тій, на якій знаходиться користувач. Зважаючи на те, що мобільні пристрої є особистими у використанні, користувач повинен задати свій зріст або приблизну відстань  $h$ , з якої він найчастіше робить фотознімки, відносно підлоги або Землі. Тоді відстань до об'єкту можна розрахувати за формулою:

$$AB = h \operatorname{tg} \theta. \quad (1)$$

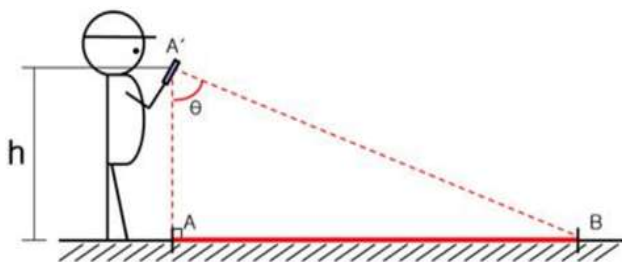


Рис. 1. Вимірювання відстані до об'єкту

Розроблений мобільний додаток використовує геоінформаційні технології для збору, аналізу, візуалізації геоданих з файлів мультимедіа шляхом визначення відстані до об'єкту за допомогою вбудованих у пристрій датчиків й математичних розрахунків та дозволяє вирішувати наступні задачі:

записувати відеофайли з різними налаштуваннями, а саме використання авто, або ручного фокусу, спалаху, рівня приближення та зберігання відеофайлу у сховище даних;

перегляд та видалення створених відеофайлів;

отримання та запис даних у форматі GPX та CSV з сенсорів пристрою та геопозиції користувача під час зйомки, налаштування точності отримання даних з сенсорів у реальному часі, визначення поточної геопозиції пристрою та отримання нових даних при зміні місця розташування;

відображення даних з датчиків пристрою та геопозиції користувача, що використовувались під час зйомки;

перегляд карт Google Maps.

Алгоритм роботи мобільного додатку наступний: при першому запуску додатку на екрані відразу з'являються діалогові вікна для запиту потрібних дозволів на використання камери, геопозиції пристрою, мікрофону та файлового сховища (рис. 2,а).

Після того як користувач дасть дозволи на використання потрібних функцій пристрою, автоматично завантажується Preview камери та налаштовуються параметри для запису майбутнього відео.

На головному екрані користувач має змогу обрати рівень приближення (zoom), торкнутися об'єкту на Preview для ручного фокусування, увімкнути постійний спалах у верхньому правому куту, відкрити активність з відзнятими проектами та почати відеозйомку, торкнувшись на кнопку посередині екрану у нижній частині (рис. 2,б).

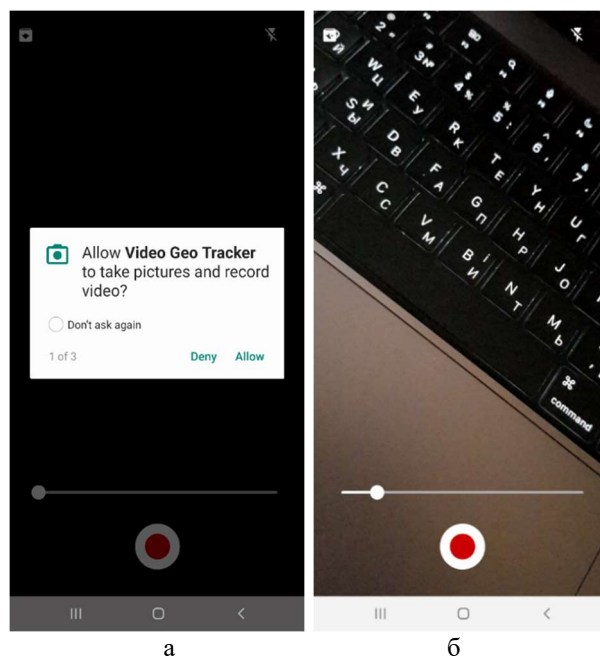


Рис. 2. Головний екран:  
а – отримання дозволу, б – форма запису відео

Коли користувач завершує зйомку, автоматично створюється директорія проекту, у яку входять одразу 3 файли:

.mp4 відео файл;

.grx файл з даними геопозиції та датчиків, що були отримані під час запису відео;

.csv файл з всіма даними як і у .grx файлі, але у зручному форматі для читання, або аналізу

даних сторонніми програмами, наприклад R-Studio, або Weka.

Уся інформація відображається під час відтворення відео файлу, позиція на мапі та дані з сенсорів будуть змінюватися відповідно до часу, збереженому у файлі .grx.

Фрагмент коду, наведений нижче, демонструє формування даних для візуалізації:

```
trackPoint
    .extensions
    .let { ext ->
        SensorManager.getRotationMatrix(
            rotationMatrix,
            null,
            floatArrayOf(
                ext.accelerometer.floatX,
                ext.accelerometer.floatY,
                ext.accelerometer.floatZ
            ),
            floatArrayOf(
                ext.magnetic.floatX,
                ext.magnetic.floatY,
                ext.magnetic.floatZ
            )
        )
        SensorManager.getOrientation(rotationMatrix,
            orientationData)
            val angle =
                abs(round(Math.toDegrees(orientationData[2].toDouble()))
            )
            val distance =
                orientationData[2].toDouble()
                .let { radians ->
                    takeUnless { angle > 90 }
                    ?.let { abs(round(100.0 *
                PHONE_HEIGHT * tan(radians) / 100.0) )
                    ?.toString()
                    ?: "NaN"
                }
            "acc:${ext.accelerometer}\n" +
                "gyro:${ext.gyroscope}\n" +
                "magn:${ext.magnetic}\n" +
                "angle:$angle\n" +
                "distance (m):$distance"
        }
        .let{
            trackPointSensorsString.postValue(it) }
    }
```

Користувач має змогу відкрити раніше створені проекти, відкривши форму Archive та обрати потрібний файл. Також можна видалити проект, натиснувши на іконку смітника (рис. 3, а).

Активність відкритого проекту розділена на дві частини, у верхній відображається Google Map з маркерами усіх геопозицій, що використовувалися під час зйомки відео, та маркером знаходження користувача відносно поточного часу відтворення відео. У нижній частині, знаходиться програвач файлів з елементами управління для відтворення відео. Поверх програвача, розташована напівпрозора форма з даними датчиків (акселерометру, гіроскопу, геомагнітного датчику), отриманими під час зйомки та

результатами розрахунків кута нахилу пристрою та відстані до об'єкту (рис. 3,б).

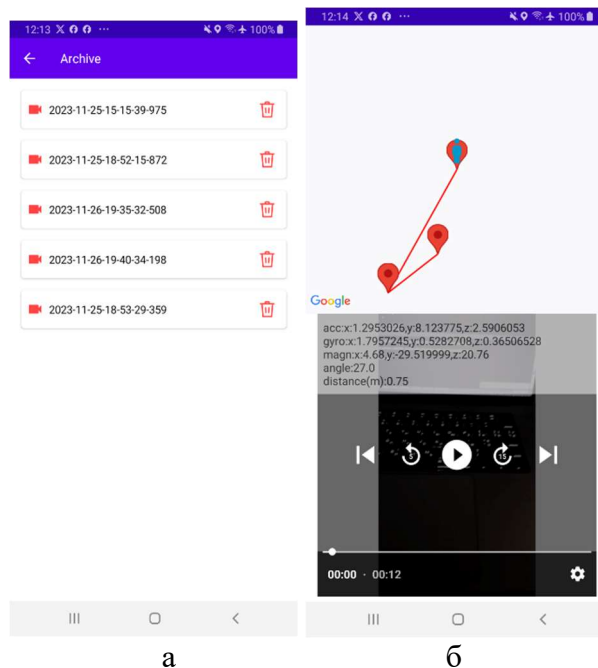


Рис. 3. Активності проекту:  
а – форма Archive, б – форма відкритого проекту

Також під час реалізації мобільного додатку були використані наступні засоби реалізації:

- Hilt – бібліотека від компанії Google, що базується на бібліотеці Dagger, для реалізації патерна програмування Dependency Injection, використовується для зменшення зв'язку коду між різними модулями;

- Google Maps – бібліотека, що використовується для відображення геопозиції користувача на мапі;

- Exo Player - один з офіційних відео програвачів для системи Android.

**Висновок.** Розроблено мобільний додаток для збору, аналізу та візуалізації геоданих з файлів мультимедіа, що дає змогу створювати архіви з відео, GPX та CSV файлами для визначення автентичності та ідентифікації медіа матеріалів. На майбутнє, є можливість інтегрувати систему у будь-який інший додаток, наприклад у Дію, для пришвидшення збору доказової бази або реалізувати відправку архівів у хмарне, захищене середовище для подальшого аналізу.

#### Література

1. Leiva A. Kotlin for Android Developers: Learn Kotlin the easy way while developing an Android App / A. Leiva // CreateSpace Independent Publishing Platform. – 2016. – 240 p.

2. Derkach M. Parking Guide Service for Large Urban Areas / M. Derkach, V. Lysak, I. Skarga-Bandurova, I. Kotsiuba // 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS). - Metz, France, 2019. – pp. 567 – 571.
3. Grinshpan A. Comparative Analysis of GPS Data / A. Grinshpan, S. Campbell // Undergraduate Journal of Mathematical Modeling: One + Two. - 2014. - Vol. 5, Iss. 2.
4. Skarga-Bandurova I. A Framework for Real-Time Public Transport Information Acquisition and Arrival Time Prediction Based on GPS Data / I. Skarga-Bandurova, M. Derkach, A. Velykzhanin // Dependable IoT for Human and Industry: Modeling, Architecting, Implementation (Eds. V. Kharchenko, Ah L. Kor, A. Rucinski). – River Publishers Series in Information Science and Technology, 2018. – P. 411-431.
5. Siuhi S. Opportunities and challenges of smart mobile applications in transportation / S. Siuhi, J. Mwakalonge // Journal of traffic and transportation engineering (english edition). – 2016. – No. 3 (6). – P. 582 - 592.
6. Basyir M. Determination of Nearest Emergency Service Office using Haversine Formula Based on Android Platform / M. Basyir, M. Nasir, Suryati, Widdha Mellyssa // EMITTER International Journal of Engineering Technology. - 2017. - Vol. 5, No. 2.
7. Manish J. Gajjar. Mobile Sensors and Context-Aware Computing / Gajjar J. Manish // Cambridge, MA: Morgan Kaufmann. – 2017. – 337 p.

#### References

1. Leiva A. Kotlin for Android Developers: Learn Kotlin the easy way while developing an Android App / A. Leiva // CreateSpace Independent Publishing Platform. – 2016. – 240 p.
2. Derkach M. Parking Guide Service for Large Urban Areas / M. Derkach, V. Lysak, I. Skarga-Bandurova, I. Kotsiuba // 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS). - Metz, France, 2019. – pp. 567 – 571.
3. Grinshpan A. Comparative Analysis of GPS Data / A. Grinshpan, S. Campbell // Undergraduate Journal of Mathematical Modeling: One + Two. - 2014. - Vol. 5, Iss. 2.
4. Skarga-Bandurova I. A Framework for Real-Time Public Transport Information Acquisition and Arrival Time Prediction Based on GPS Data / I. Skarga-Bandurova, M. Derkach, A. Velykzhanin // Dependable IoT for Human and Industry: Modeling, Architecting, Implementation (Eds. V. Kharchenko, Ah L. Kor, A. Rucinski). – River Publishers Series in Information Science and Technology, 2018. – P. 411-431.
5. Siuhi S. Opportunities and challenges of smart mobile applications in transportation / S. Siuhi, J. Mwakalonge // Journal of traffic and transportation

- engineering (english edition). – 2016. – No. 3 (6). – P. 582 - 592.
6. Basyir M. Determination of Nearest Emergency Service Office using Haversine Formula Based on Android Platform / M. Basyir, M. Nasir, Suryati, Widdha Mellyssa // EMITTER International Journal of Engineering Technology. - 2017. - Vol. 5, No. 2.
7. Manish J. Gajjar. Mobile Sensors and Context-Aware Computing / Gajjar J. Manish // Cambridge, MA: Morgan Kaufmann. – 2017. – 337 p.

#### **Derkach M., Ostopolets V., Derevyanchenko V. Development of mobile application for determining authenticity of media file**

*The article considers the task of developing a mobile application for collecting, analyzing, and visualizing geodata from multimedia files to solve the problem of identification and authenticity of media materials, since existing solutions do not use a group of tags called "extensions" of files of the standard GPX format, that is, additional data obtained from mobile device sensors, including waypoints, tracks, and routes. Unlike them, the developed mobile application allows you to compare the data from the sensors in the media files with the data of the specified area, thereby identifying and establishing the authenticity or falsification of the file. Recently, this has become more and more especially relevant, as thanks to media materials, it is possible to reliably prove whether any manipulations have been carried out with the file, which confirms or refutes the authenticity of events in various spheres of life, even in the legal and analytical spheres. Also, the mobile application allows you to create video files stored in the device's local storage together with GPX and CSV files containing data obtained during shooting from common sensors and services built into many modern mobile devices. The developed mobile application allows you to visualize geodata in Google Map, and display data from sensors (accelerometer, gyroscope, geomagnetic sensor) on the video player panel along with the calculated angle of inclination of the device and the distance to the object thanks to trigonometric formulas. During the implementation of the mobile application, such tools were used as the development environment - Android Studio Giraffe, the programming language for the Android system, the well-known developer JetBrains - Kotlin, the library for implementing the Dependency Injection programming pattern - Hilt, the library for visualizing the user's geolocation on the map - Google Maps, video player for the Android system - Exo Player. The mobile application has a simple and intuitive interface, is supported by the Android 5.0 operating system and above (that is, it is supported on 99% of all Android devices), is not demanding on resources, and has a flexible and modular Google Android App Architecture.*

**Keywords:** authenticity, geodata, sensor, media file, mobile application.

**Деркач М.В.** – доцент кафедри комп’ютерних наук та інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, доцент кафедри кібербезпеки Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, e-mail: [derkach@snu.edu.ua](mailto:derkach@snu.edu.ua)

**Остоплець В.Ю.** – здобувач вищої освіти Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: [frezze09@gmail.com](mailto:frezze09@gmail.com)

**Дерев’янченко В.С.** – асистент кафедри комп’ютерних наук та інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: [derevyanchenko@snu.edu.ua](mailto:derevyanchenko@snu.edu.ua)

Стаття подана 12.10.2023.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2023-279-3-11-15>

УДК 004.04:535.4

## РЕЗУЛЬТАТИ ПЕРВИННОЇ ОБРОБКИ ІНТЕРФЕРОГРАМИ ДЛЯ ПОБУДОВИ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Шопін П. Ю., Хорошун Г. М., Барбарук В.М., Рязанцев О.І.

## RESULTS OF PRIMARY INTERFEROGRAM PROCESSING FOR MACHINE LEARNING MODEL CONSTRUCTION

Shopin P.Y., Khoroshun G.M., Barbaruk V.M., Ryazantsev O.I.

*Робота присвячена обробці інтерферометричних відео та зображень для дисциплін, де вимагається високоточне та динамічне вимірювання фізичних параметрів. Застосування моделей машинного навчання додає нові можливості до аналізу інтерферометричних даних, роблячи їхнє використання більш ефективним та точним. Інтерферометрія застосовується для різноманітних вимірювань, які базуються на інтерференційних явищах для визначення статистичних та динамічних параметрів об'єктів. Вимірювання статичних параметрів за допомогою інтерферометрії може включати: висоту поверхні, деформацію поверхні, товщину шару матеріалу, оптичні властивості, такі як коефіцієнти пропускання чи відбивання світла, напруження та деформацію матеріалу, розташування об'єктів та кутові виміри. Інтерферометри можуть вимірювати динамічні параметри, такі як швидкість та напрямок руху об'єктів в транспортних системах та біологічних клітинах. Інтеграція методів машинного навчання в аналіз інтерферограм може значно покращити ефективність та точність отриманих результатів, особливо в умовах великого обсягу даних та складних паттернів. Основні задачі, які можна виділити для застосування методів машинного навчання це фільтрація шумів, сегментація об'єктів, прогнозування змін, корекція артефактів, оптимізація обробки даних. Для того, щоб побудувати модель машинного навчання необхідно дослідити реальні інтерференційні картини, визначити основні параметри моделі, реалізувати методи автоматичної обробки зображення. Отже, в роботі досліджено реальні інтерференційні картини, надано їх опис, проведена автоматизація процесу визначення їх якості та надання рекомендацій щодо застосування. В даній роботі ми аналізуємо відео експерименту отримання інтерференційної картини, з використанням*

*інтерферометра Маха-Цендера. Досліджено реальні інтерференційні картини отриманні з відеозапису зйомки роботи інтерферометра Маха-Цендера. Проведено аналіз поведінки інтерференційних смуг - вздовж осі X та вздовж осі Y. Визначені особливі ділянки та характеристики реального сигналу в перерізі інтерферограми. Згідно до отриманих результатів проведено сегментацію зображення. Визначена характерна поведінка в часі світла в цих сегментах. Визначили які сегменти найкращі та найгірші для аналізу та в який проміжок часу.*

**Ключові слова:** підготовка даних, інтерферограма, обробка зображення

**Постановка та аналіз проблеми.** В сучасному світі для обробки зображень використовуються різні алгоритми та моделі машинного навчання [1-3]. Інтерферометрія, підтримана сучасними методами обробки даних та аналізу [4,5], відіграє ключову роль у великому спектрі дисциплін, де вимагається високоточне та динамічне вимірювання фізичних параметрів. Застосування моделей машинного навчання додає нові можливості до аналізу інтерферометричних даних, роблячи їхнє використання більш ефективним та точним. Інтерферометрія [6-10] застосовується для різноманітних вимірювань, які базуються на інтерференційних явищах для визначення статистичних та динамічних параметрів об'єктів. Вимірювання статичних параметрів за допомогою інтерферометрії може включати: висоту поверхні, деформацію поверхні, товщину шару матеріалу, оптичні властивості, такі як коефіцієнти пропускання чи відбивання світла,

напруження та деформацію матеріалу, розташування об'єктів та кутові виміри.

Інтерферометри можуть вимірювати динамічні параметри, такі як швидкість та напрямок руху об'єктів в транспортних системах та біологічних клітинах. Інтеграція методів машинного навчання в аналіз інтерферограм може значно покращити ефективність та точність отриманих результатів, особливо в умовах великого обсягу даних та складних паттернів. Основні задачі, які можна виділити для застосування методів машинного навчання це фільтрація шумів, сегментація об'єктів, прогнозування змін, корекція артефактів, оптимізація обробки даних. Для того, щоб побудувати модель машинного навчання необхідно дослідити реальні інтерференційні картини, визначити основні параметри моделі, реалізувати методи автоматичної обробки зображення.

Метою роботи є дослідження реальних інтерференційних картин, надання їх опису, автоматизація процесу визначення їх якості та надання рекомендацій щодо застосування.

Для досягнення цієї мети, необхідно виконати наступні завдання:

- провести аналіз поведінки інтерференційних смуг;
- провести сегментацію зображення;
- надати характерну поведінку в часі світла в цих сегментах;
- навести рекомендації, щодо використання кожного сегменту в прикладних оптичних задачах.

**Отримання інтерферограми.** Інтерференція світла — перерозподіл інтенсивності світла в результаті накладення (суперпозиції) декількох когерентних світлових хвиль. Методами комп'ютерної симуляції отримана теоретична ідеальна інтерференційна картина у вигляді смуг рівної товщини (Рис.1). Когерентні хвилі – це хвилі, які мають однакову частоту та постійний зсув фаз. В моделюванні явища інтерференції використовувались хвилі, показані на рис.2.

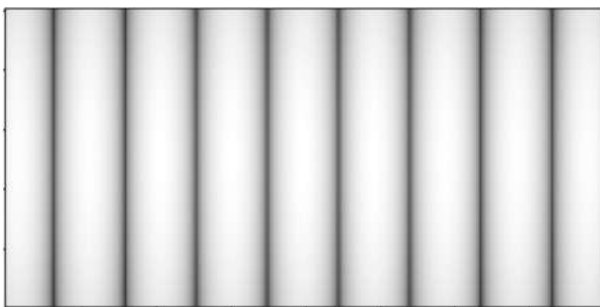


Рис. 1 Інтерференційна картина у вигляді смуг рівної товщини

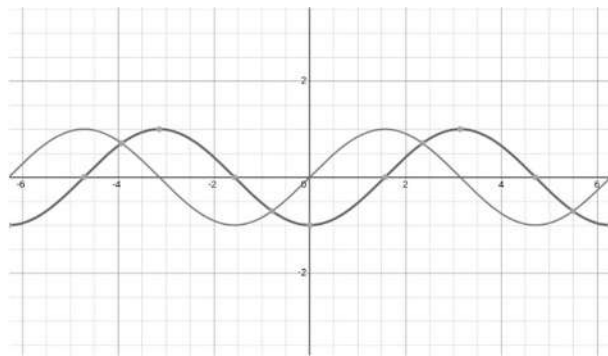


Рис. 2 Приклад когерентних хвиль

Для створення інтерференційної картини необхідно розділити монохромну хвилю від одного джерела випромінювання на дві або більше когерентні хвилі, а потім направити їх на площину спостереження.

Методи отримання когерентних хвиль:

- Розділення по фронту хвилі (експеримент Юнга, біпрізмовий підхід Френеля і інш.);
- Розділення по амплітуді (Кільця Ньютона, інтерферометр Майкельсона, інтерферометр Маха-Цендера);

В даній роботі ми аналізуємо відео експерименту отримання інтерференційної картини, з використанням інтерферометра Маха-Цендера, яке було записано в Інституті Фізики НАН України.

**Обробка інтерферограми.** Програмне забезпечення для обробки відео файлу з інтерферограмою обираємо таке, що забезпечить дослідження як просторових, так і часових параметрів інтерференційних картин з експеримента. Достатньо опробованим та сучасним інструментом є Jupyter Notebook. Для роботи з відео і зображеннями ми використовували бібліотеку OpenCV в віртуальному середовищі мови Python. Для формування даних та аналізу, в нагоді стали добре відомі бібліотеки Numpy та Pandas, а для побудови графіків - Matplotlib.

Опис відео файлу інтерферограми містить наступні характеристики: тривалість – 31 хв. 8с., кількість кадрів в секунду – 7, роздільна здатність фрейму – 1280 x 720. Всього для дослідження використано 13027 фреймів. Приклад експериментальної інтерферограми (Рис.3) значно відрізняється від теоретичної (Рис.1) наявністю шумів, артефактів та неоднорідною освітленістю картини.

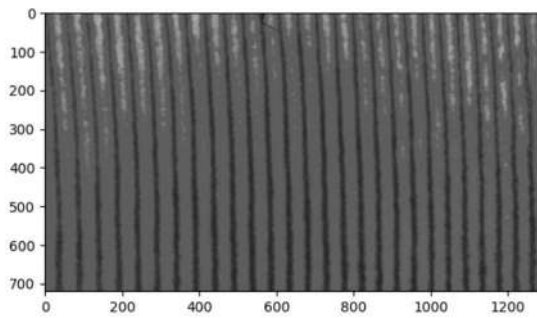


Рис. 3. Експериментальна інтерференційна картина

Зазначимо, що в перші хвилини відеозапису зображення змінюється з такого, як на рис. 3 до розмитого, як на рис. 4. Цей процес, як правило, відбувається внаслідок тремтіння оптичних елементів та нестабільному випромінюванню лазерного пучка.



Рис. 4. Кадр на якому інтерференційна картина розмита

Ще одним типом зображень для класифікації є зображення поля на якому ми майже не бачимо інтерференційних смуг. Ця ситуація спостерігається, коли світло від стороннього джерела накладається на інтєрферограму та робить її візуалізацію неможливою (Рис. 5).

Дослідимо інтерференційну картину на рис.3. Розподіли інтенсивності вздовж координатних осей  $X$  та  $Y$  є просторовими характеристиками інтерферограми. На розподілах вздовж осі  $X$  (Рис. 6) бачимо зміну максимального значення інтенсивності, наявність деякої порогової інтенсивності близько 80, яка розділює інтерференційну картину на верхню та нижню половини з різною товщиною смуг. При всіх недоліках періодичність картини залишається такою, що забезпечує надійне вимірювання її періоду та зсуву смуг.

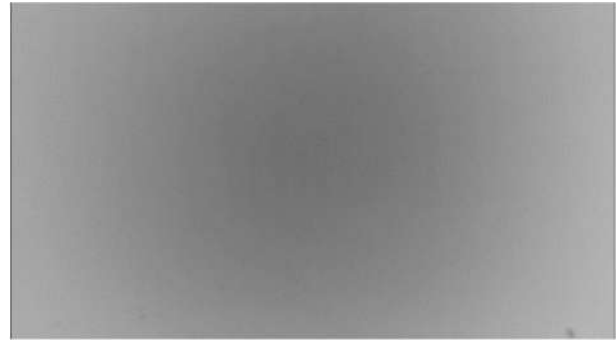
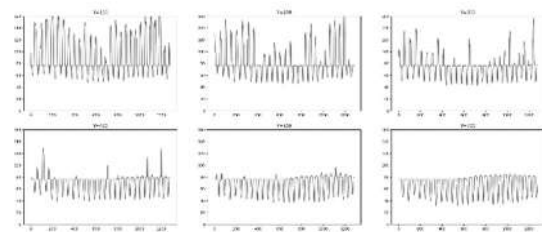


Рис. 5. Кадр демонструє світло від стороннього джерела

Рис. 6. Розподіл інтенсивності в фіксованих позиціях  $Y$  вздовж  $X$ 

Переріз розподілу інтенсивності вздовж осі  $Y$  для фіксованих значень  $X$  має зовсім інший вигляд. В ідеалі це має бути лінія з постійним значенням інтенсивності та вказувати на те на якій частині інтерференційної смуги знаходиться ця точка – в області мінімуму, максимуму або значення, що знаходиться між ними. Внаслідок того, що інтерференційні смуги мають вигин (рис. 3), на одному перерізі спостерігаються різні значення інтенсивності (рис. 7). Для аналізу картини необхідно обирати область в якій інтенсивність змінюється мінімально. Але ми знову бачимо лінію навколо значення інтенсивності 80, яка не є найкращою областю для вимірювання, а скоріше «мертвою» зоною, в якій вимірювання не рекомендується проводити.

Аналізуючи розподіл зображення на рис. 7 можна виділити три області з різною поведінкою інтенсивності. Тому виконаємо сегментацію зображення (рис. 3) в форматі  $3 \times 3$  та пронумеруємо сегменти для подальшої роботи з ними (рис. 8). Для інтерференційних досліджень є важливим встановлення товщини смугу, її зсуву та вигину лінії. В кожній з 9-ти областей можна провести такі вимірювання, але найбільш наближений варіант до розрахункового розподілу мають області з перпендикулярними до осі  $X$  смугами з мінімальними кутами відхилення від прямої лінії – це 9-й сегмент.

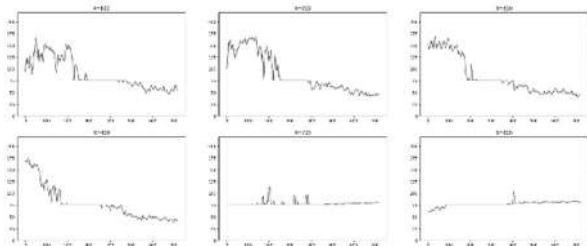


Рис. 7. Інтенсивність в фіксований момент вздовж Y

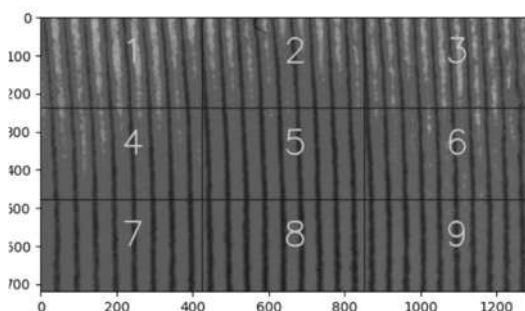


Рис. 8. Сегментоване зображення інтерференційної картини

Проведемо часовий аналіз відео інтерференційної картини. Відео триває 1868 секунд. За цей час фіксується 3 типи картин: інтерферограма з найбільш чіткими смугами, погіршення візуалізації картини в певних часових проміжках, а також засвічення інтерференції додатковим джерелом світла. В центрі кожного сегмента побудуємо залежність значення інтенсивності від часу (рис. 9).

Найкращим варіантом для проведення досліджень має бути постійна інтенсивність. Але достатньо визначити часові проміжки в яких інтерференційна картина є чіткою та такою, що мінімально змінюється і обробляти отримані дані. Визначили що для аналізу найкращий час зйомки, як найбільш стабільний з  $\sim 7$  хв відео по 30 хвилину. Також визначили, що у 8 сегменті картина більш схожа до ідеальної. Найбільш неоднорідні за інтенсивністю 1 та 3 сегменти – не рекомендуються для аналізу.

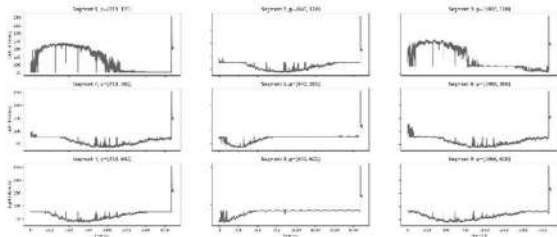


Рис. 9. Часовий розподіл інтенсивності в центрі кожного сегмента від 1 до 9

**Подяка.** Автори дякують співробітникам відділу оптичної квантової електроніки Інституту Фізики НАН України за надані експериментальні дані у вигляді відео файлу експерименту отримання інтерференційної картини з використанням інтерферометра Маха-Цендера.

**Висновки.** Досліджено реальні інтерференційні картини отриманні з відеозапису зйомки роботи інтерферометра Маха-Цендера. Проведено аналіз поведінки інтерференційних смуг - вздовж осі X та вздовж осі Y. Визначені особливі ділянки та характеристики реального сигналу в перерізі інтерферограми. Згідно до отриманих результатів проведено сегментацію зображення. Визначена характерна поведінка в часі світла в цих сегментах. Визначено особливості розподілу інтенсивності в різних сегментах в просторі та часі.

Надалі планується проведення досліджень методами машинного навчання з метою фільтрації шумів, сегментації зображень, прогнозуванні змін, корекції артефактів, оптимізація обробки даних.

#### Л і т е р а т у р а

1. Andrew Wolf, Machine Learning Simplified: A gentle introduction to supervised learning, 2022, p. 199 URL:<https://www.goodreads.com/book/show/60297347-machine-learning-simplified>
2. Maheshwari A. Business intelligence and data mining. – Business Expert Press, 2014. URL: <https://www.amazon.com/Business-Intelligence-Data-Mining-Analytics/dp/1631571206>
3. Yang X. S. Introduction to Algorithms for Data Mining and Machine Learning. – Academic Press, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/C2018-0-02034-4>
4. Fernandes M. Statistics for business and economics. – Bookboon, 2008. URL: <https://bookboon.com/en/statistics-for-business-and-economics-ebook?mediaType=ebook>
5. Ryazantsev O., Khoroshun G., Riazantsev A., Ivanov V., Baturin A. Statistical Optical Image Analysis for Information System // Proceedings of 2019 7th International Conference on Future Internet of Things and Cloud Workshops (FiCloudW), Istanbul, Turkey, IEEE 2019, pp. 130-134, DOI: 10.1109/FiCloudW.2019.00036
6. Senthilkumaran, P., Masajada, J., & Sato, S. (2012). Interferometry with vortices. *International Journal of Optics*, 2012.
7. Bekshaev, A. Y., Basistiy, I. V., Slyusar, V. V., Soskin, M. S., & Vasnetsov, M. V. (2002). Observation of the rotational Doppler effect with an optical-vortex one-beam interferometer. *Укр. фіз. журн.*, 47(11), 1035-1040.
8. Khoroshun, Anna. "Shearing Interferometers with a Singular Source of Light." *Interferometers: Fundamentals, Methods and Applications* (2015): 253-267.
9. Angelsky, O. V., Mokhun, I. I., Mokhun, A. I., & Soskin, M. S. (2002). Interferometric methods in diagnostics of

polarization singularities. *Physical Review E*, 65(3), 036602.

10. Bekshaev, A. Ya, et al. "Spectral characteristics of the Fabry-Perot interferometer transmission upon illumination by an arbitrary light beam." *arXiv preprint arXiv:1812.11687* (2018).

**Shopin P.Y., Khoroshun G.M., Barbaruk V.M., Ryazantsev O.I. Results of primary interferogram processing for machine learning model construction**

*The work is dedicated to processing interferometric videos and images for disciplines that require precise and dynamic measurement of physical parameters. The application of machine learning models enhances the analysis of interferometric data, making their utilization more efficient and accurate. Interferometry [6-10] is employed for various measurements based on interference phenomena to determine statistical and dynamic object parameters. Measurement of static parameters using interferometry may include surface height, surface deformation, material layer thickness, optical properties such as light transmission or reflection coefficients, material stress and deformation, object positioning, and angular measurements. Interferometers can measure dynamic parameters such as the speed and direction of movement of objects in transportation systems and biological cells. The integration of machine learning methods into interferogram analysis can significantly improve the efficiency and accuracy of results, especially in conditions involving large datasets and complex patterns. Key tasks for applying machine learning methods include noise filtration, object segmentation, change prediction, artifact correction, and data processing optimization. To build a machine learning model, it is necessary to investigate real interferometric patterns, determine the model's key parameters, and implement automatic image processing methods. Thus, the study explores real interferometric patterns, provides their description, and automates the process of determining their quality, offering recommendations for application. In this work, we analyze a*

*video experiment to obtain an interferometric image using the Mach-Zehnder interferometer. Real interferometric patterns obtained from the video recording of the Mach-Zehnder interferometer operation are investigated. The behavior of interferometric fringes along the X and Y axes is analyzed, identifying specific areas and characteristics of the real signal in the interferogram cross-section. Based on the results obtained, image segmentation is performed, determining the characteristic behavior of light over time in these segments. The study identifies which segments are most and least suitable for analysis and within what time intervals.*

**Keywords:** data preparation, interferogram, image processing

**Шопін Петро Юрійович**, студент кафедри комп'ютерних наук та інженерії, Східноукраїнський Національний Університет імені Володимира Даля, [shopin.peter@gmail.com](mailto:shopin.peter@gmail.com)

**Хорошун Ганна Миколаївна**, кандидат фізико-математичних наук, доцент, професор кафедри комп'ютерних наук та інженерії, Східноукраїнський Національний Університет імені Володимира Даля, [horoshun@snu.edu.ua](mailto:horoshun@snu.edu.ua)

**Барбарук Віктор Миколайович**, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем та технологій, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», [barbaruk.viktor@gmail.com](mailto:barbaruk.viktor@gmail.com)

**Рязанцев Олександр Іванович**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерних наук та інженерії, Східноукраїнський Національний Університет імені Володимира Даля, [a\\_ryazantsev@ukr.net](mailto:a_ryazantsev@ukr.net)

Стаття подана 15.10.2023.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2023-279-3-16-24>

УДК 691.3

## ЛАБОРАТОРНО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ДЛЯ ОТРИМАННЯ КОНДЕНСАТУ ДИМОВИХ ГАЗІВ ТА ЙОГО УТИЛІЗАЦІЯ

Михайлюк В. В.

## LABORATORY EXPERIMENTAL INSTALLATION FOR OBTAINING FLUE GAS CONDENSATE AND ITS DISPOSAL

Mykhailiuk V.V.

На даний час цемент є одним із основних будівельних матеріалів, який використовується під час спорудження різноманітних інженерних конструкцій та споруд. Технологічний процес виготовлення цементу є багатоетапним та вимагає високої культури виробництва для забезпечення екологічної безпеки. Повний цикл виробництва товарного цементу негативно впливає на навколишнє середовище: глобальне потепління (через викиди парникових газів), підкислення Світового океану (переважно, через викиди оксидів вуглецю, азоту, сірки), деградацію земель (через забруднення земель важкими металами). Існують різноманітні способи виготовлення цементів, які відрізняються технологічно і звичайно по-різному впливають на екологію. Тому важливим залишається вивчення основних видів викидів під час виготовлення цементу та заходів для зменшення або усунення їх впливу на навколишнє середовище. Основними проблемами під час виробництва цементу є зниження викидів водяної пари, пилу, оксидів азоту  $NO_x$ , діоксиду сірки, оксиду та діоксиду вуглецю. Для очищення чи зменшення таких забруднень використовують різноманітне обладнання: електрофільтри, рукавні фільтри, гібридні фільтри, мокрі скрубери тощо. Проте застосування вищезгаданого обладнання не повністю усуває шкідливі викиди при виробництві цементу. У роботі пропонується спосіб та обладнання для зниження викидів шкідливих речовин з димових газів цементного виробництва – спосіб виділення рідини і механічних домішок із газового потоку. Основною задачею пропонованого способу є підвищення ефективності очищення газу у великих об'ємах від водяної пари та механічних домішок для забезпечення екологічної безпеки, що полягає у вилученні водяної пари (отримання конденсату пари димових газів). З метою утилізації конденсату пари димових газів пропонується його застосування у виробництві бетону. Проведено експериментальні дослідження

цементного каменю отриманого з використанням конденсату пари димових газів цементного виробництва. При цьому визначено механічні характеристики отриманого цементного каменю (напруження згину  $\sigma_{зз}$ , стиску  $\sigma_{ст}$  та крихкість  $K_k$ ) та проведено їх порівняння із цементним каменем виготовленим за традиційним способом. Встановлено, що найкращим за механічними властивостями є цементний камінь, отриманий із застосуванням конденсату пари димових газів.

**Ключові слова:** цемент, шкідливі викиди, газорідний сепаратор, конденсат пари димових газів, цементний камінь, бетон, утилізація.

**Вступ.** Цемент – один із найпоширеніших будівельних матеріалів, який використовується для виготовлення бетонів, залізобетонних виробів, для скріплення окремих деталей будівельних конструкцій, гідроізоляції, також під час спорудження свердловин, виготовлення фундаментів під різноманітні машини та механізми у нафтогазовій галузі.

Коротко наводимо інформацію про виробництво цементу.

Цементна промисловість – матеріаломістка галузь, тому цементні заводи розміщують у районах видобування сировини. При виробництві 1 т клінкеру (напівфабрикату цементу) витрачається 1,5 т карбонатних порід (мергелю, доломіту, вапняків, крейди) і майже 0,5 т глини [1].

Життєвий цикл цементу розпочинається з отримання сировини (мергель, вапняк, крейда, глина) у кар'єрах, які розташовані переважно поблизу цементного заводу. Після видобутку

сировина подрібнюється безпосередньо в кар'єрі і транспортується на цементний завод для проміжного зберігання, гомогенізації і подальшої переробки. На наступному етапі сировина сушиться і перетирається в певних і добре контрольованих пропорціях у млинах, в результаті чого виходить сировинна мука для сухого (і напівсухого) процесу. При мокрому процесі сировина подрібнюється з певною кількістю води для отримання рідкого цементного тіста. Добутий проміжний продукт – тобто сировинне борошно або рідке цементне тісто (або їх похідні) – зберігається і далі гомогенізується в бункерах сировинної суміші або шламових басейнах, в результаті чого досягається і підтримується необхідний однорідний хімічний склад перед відправленням у піч. Далі готова сировина надходить у печі, де піддається тепловому обробленню, яка складається з послідовних етапів висихання/підігріву, прожарювання і спікання. Спечений продукт «клінкер» охолоджується потоком повітря до 100-200°C і транспортується до місця зберігання. На наступному етапі відбувається помол клінкеру з додаванням різних добавок. Після цього отриманий цемент пакується і транспортується до кінцевого споживача [1].

Повний цикл виробництва товарного цементу впливає на всі критичні процеси земної системи, які загрожують екологічній стійкості планети, – на глобальне потепління (через викиди парникових газів), підкислення Світового океану (переважно, через викиди оксидів вуглецю, азоту, сірки), деградацію земель (через забруднення земель важкими металами).

Виробництво цементу щорічно вносить у атмосферу біля 8% від загального об'єму вуглекислого газу. Це величезні об'єми, знизити які намагаються багато вчених з усього світу. Для цього використовують енергозберігаючі технології, унікальні добавки та техпроцеси тощо [1].

У виробництві цементу використовують переважно мокрий, сухий, напівсухий та комбінований способи. Перелічені технології різняться за способам приготування сировинної суміші та випалу клінкеру. Матеріальні баланси процесу виробництва 1 т портландцементного клінкеру мокрим та сухим способами виробництва [1].

В екологічному аспекті мокрий спосіб має найбільший негативний вплив на довкілля з урахуванням витрат матеріальних ресурсів і викидів забруднюючих речовин [2]. Споживання матеріальних ресурсів і викидів збільшується на 1,5 т/т клінкеру. Виробництво

портландцементного клінкеру мокрим способом, порівняно з сухим, вимагає майже вдвічі більших витрат палива. Тепло, що виділяється при спалюванні технологічного палива, витрачається на теплові процеси клінкероутворення, випаровування води, а також втрачається з газами, що відходять, з повітрям з клінкерного холодильника, з гарячим клінкером і на прямі втрати у довкілля.

Виробництво портландцементу є матеріаломістким процесом. Промислові відходи різного походження можуть заміщувати значну кількість сировинних матеріалів при випалюванні портландцементного клінкеру. Також постійно збільшується використання промислових відходів в якості мінеральних добавок при помолі портландцементу [2].

Використання промислових відходів як сировини при виробництві цементу зазвичай дозволяє знизити питомі витрати тепла на випал 1 т портландцементного клінкеру і підвищити продуктивність обертової печі.

Постійний контроль за вмістом шкідливих речовин у відходах і використання правильного способу їхнього введення до складу сировинної суміші або цементу запобігає збільшенню шкідливих викидів в атмосферу при випалюванні портландцементного клінкеру або помолу портландцементу і не впливає на якість виробленого цементу [2].

**Аналіз закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій.** Під час виробництва цементу виділяється багато різноманітних викидів, які негативно впливають на навколишнє середовище. З метою зменшення цих викидів розроблено багато різних технологій і цілих комплексів обладнання.

**Зниження викидів пилу з організованих джерел [1]**

На цементному заводі є різні джерела організованих викидів пилу: печі, клінкерні холодильники і млини для помолу сировинних матеріалів, цементу та вугілля, а також допоміжне обладнання. Основна частина пилу викидається в атмосферу з обертових печей для випалу портландцементного клінкеру. Однак методи і принципи зниження викидів пилу з обертових печей використовуються і для інших джерел організованих викидів пилу.

Основна частина викидів пилу (у тому числі розміром частинок менше 2,5 мкм) може бути знижена за рахунок зменшення загальної величини пиловиділення, що досягається шляхом використання ефективної системи пиловловлювання. У минулому використовувалися різні

знепилюючі пристрої, а з 2007 року головними знепилюючими установками стали рукавні фільтри, електрофільтри або їх поєднання – так звані гібридні фільтри.

Для зниження викидів пилу з організованих джерел використовуються технології та обладнання:

- сучасні електрофільтри або рукавні фільтри, оптимізовані для очищення конкретного виду газів;

- гібридні фільтри;

- системи управління ремонтом, спеціально спрямованої на спостереження за станом фільтрів.

**Зниження викидів пилу з неорганізованих джерел [1].**

Джерелами утворення неорганізованих пилових викидів є процеси складування та переробки сировинних матеріалів, палива і клінкеру, а також будь-які транспортні засоби, що використовуються на території виробництва. Компактне розташування об'єктів є найбільш простим способом зниження неорганізованих викидів пилу. Регулярне і ретельне обслуговування установок завжди призводить до прямого зниження неорганізованих викидів пилу завдяки зменшенню підсосу повітря або запобігання негерметичності установок.

Використання автоматичних приладів і системи контролю також сприяє зниженню викидів пилоподібних частинок, так само як і постійна безвідмовна надійна робота установок. Щоб знизити викиди дисперсного пилу на відкритому складі, де розміщені сировинні матеріали або паливо, штабелі і майданчики навалного зберігання можуть бути закриті або укріплені за допомогою різних перегородок, покриттів, розділені стінами або огорожами, що складаються з вертикальних зелених рослин (штучні або природні бар'єри для запобігання впливу вітру).

Для досягнення мінімізації викидів пилу з неорганізованих джерел використовуються наступні технології та обладнання:

- укриття/капсулювання операцій, пов'язаних з виділенням пилу;

- використання закритих конвеєрів та елеваторів;

- зменшення місць підсмоктування повітря або просипання матеріалу, герметизація установок;

- використання гнучких шлангів та рукавів, забезпечених системою уловлювання пилу, при навантаженні цементу в цементовоз;

- захист від вітру;

- водне обприскування і хімічні речовини, що пригнічують утворення пилу;

- покриття, миття доріг та їхнє прибирання;

- зволоження штабелів.

**Зниження викидів оксидів азоту  $NO_x$  [1].**

Випал клінкеру є високотемпературним процесом, в результаті якого утворюються оксиди азоту. Ці оксиди є одними з ключових забруднювачів, що викидаються цементними заводами в повітря. Вони утворюються в процесі обпалу зв'язуванням азоту з киснем у полум'ї або зв'язуванням атмосферного азоту та кисню повітря, що подається на горіння.

Існує два джерела для утворення  $NO_x$ :

1) теплові  $NO_x$ : частина азоту в повітрі під час горіння взаємодіє з киснем з утворенням оксидів азоту;

2) паливні  $NO_x$ : сполуки, які містять азот, хімічно зв'язані в паливі, реагують з киснем повітря з утворенням різних оксидів азоту.

Для зниження викидів  $NO_x$  застосовуються як первинні технічні рішення, інтегровані в технологічний процес, так і спеціальні технології або їхнє поєднання з первинними технічними рішеннями:

- оптимізація процесу випалу;

- охолодження полум'я факела;

- застосування пальників з низьким виділенням  $NO_x$ ;

- постадійне спалювання палива, спалювання палива в середній частині печі;

- використання мінералізаторів;

- технологія селективного некаталітичного відновлення  $NO_x$  (SNCR);

- технологія селективного каталітичного відновлення  $NO_x$  (SCR).

Для зниження викидів  $NO_x$  у відведених пічних газах використовують:

- оптимізацію процесу випалу;

- охолодження полум'я факела;

- пальники з низьким виділенням  $NO_x$ ;

- постадійне спалювання палива, спалювання палива в середній частині печі;

- мінералізатори при випалюванні клінкеру;

- технології селективного некаталітичного відновлення оксидів азоту SNCR;

- технології селективного каталітичного відновлення оксидів азоту SCR.

**Викиди діоксиду сірки [1].**

Викиди  $SO_2$  на цементних заводах залежать від загальної кількості сульфатних сполук, способу виробництва і передусім визначаються вмістом леткої сірки в сировинних матеріалах і паливі. Потенційні викиди  $SO_2$  залежать від

циркуляції сірки в печі. Сірка викидається з печей у вигляді  $\text{SO}_2$  у вихідних газах,  $\text{CaSO}_4$  та інших компонентах клінкеру і пилу. Однак значна частина сірки залишається у клінкері або вивантажується з системи.

Зниження викидів діоксиду сірки  $\text{SO}_2$  при виробництві цементу здійснюється по стадійно.

Першим кроком зниження викидів  $\text{SO}_2$  є реалізація первинних технічних рішень:

- вибір сировинних матеріалів, палива і відходів (при їхньому використанні) з невисоким вмістом вільної сірки або сірки у вигляді сульфідів;

- оптимізація процесу випалу клінкеру, що передбачає стабільну роботу печей;

- однорідний розподіл нагрітого матеріалу в печі;

- запобігання утворенню відновлювальної атмосфери при випалюванні клінкеру.

Концентрація кисню на вході матеріалу в піч є вирішальним фактором зв'язування  $\text{SO}_2$  сировинними матеріалами. Збільшення вмісту кисню в печі знижує кількість викидів  $\text{SO}_2$ . Надлишок кисню забезпечує утворення сульфатів у нижній частині циклонного теплообмінника, які виходять з печі разом з клінкером.

Застосування системи байпасу запобігає накопиченню в печі легкоплавких сульфідів лужних металів і призводить до деякого зниження викидів  $\text{SO}_2$ .

Баланс для захисту довкілля повинен бути знайдений завдяки оптимізації співвідношення викидів  $\text{NO}_x/\text{SO}_2/\text{CO}$  шляхом регулювання вмісту кисню в печі. Якщо первинних технічних рішень недостатньо, необхідно використовувати радикальні технічні рішення.

Радикальними технічними рішеннями, які дозволяють різко знизити викиди  $\text{SO}_2$  з цементних печей, є використання добавок сорбенту або застосування мокрого скрубера.

Для зниження викидів  $\text{SO}_2$  у відведених пічних газах шляхом застосування технічних рішень використовують:

- вибір сировинних матеріалів, палива і відходів (при їх використанні) з невисоким вмістом вільної сірки або сірки у вигляді сульфідів;

- добавки сорбенту (абсорбенту);

- мокрий скрубер.

**Викиди оксиду та діоксиду вуглецю [1].**

Визначено, що викиди  $\text{CO}_2$  становлять 900-1000 кг/т сірого клінкеру при споживанні тепла 3500-5000 кДж/т клінкеру. Однак ця величина залежить від типу палива, що споживається. Завдяки подрібненню цементу з мінеральними домішками кількість виділеного  $\text{CO}_2$  знижується у

перерахунку на тону цементу. Близько 62% від загальної кількості  $\text{CO}_2$  виділяється у процесі декарбонізації вапняку сировинної суміші, а ті, що залишилися 38%, – при горінні палива. Виділення  $\text{CO}_2$  при згорянні палива прямо пропорційні питомій витраті тепла на випал клінкеру і співвідношенню вмісту в ньому вуглецю до його теплотворної здатності. За останні 25 років виділення  $\text{CO}_2$  при згорянні палива знизилися приблизно на 30% у зв'язку з постійним збільшенням ефективності процесів його спалювання в печі.

Виділення  $\text{CO}$  і вуглецю, зв'язаного в органічні сполуки, в процесі випалу клінкеру в печі пояснюється наявністю невеликої кількості органічних сполук у природних сировинних матеріалах (залишки організмів і рослин, що містяться у гірських породах у процесі геологічних відкладень). Перебуваючи в теплообміннику, матеріали окислюються з утворенням  $\text{CO}$  і  $\text{CO}_2$ . У цьому процесі з органічного вуглецю також може утворитися невеликий обсяг (сліди) органічних газів. Отже, вміст  $\text{CO}$  у газах, а також слідів органічних газів, не дозволяє зробити жодних висновків про умови горіння палива в самій обертовій печі. Додаткові викиди  $\text{CO}$  можуть бути результатом неповного спалювання палива або неправильно підібраних умов горіння у декарбонізаторах. Однак таке збільшення викидів  $\text{CO}$  зазвичай збігається зі зниженням викидів оксидів азоту  $\text{NO}_x$ . В той же час такі відновлювальні умови горіння можуть сприяти утворенню та збільшенню  $\text{SO}_2$ .

На теплоелектростанціях концентрація  $\text{CO}$  та органічно пов'язаних вуглеців у відхідних димових газах є критерієм недопалу палива. На відміну від цього процес випалу клінкеру є процесом перетворення матеріалу, який може відбуватися з надлишком повітря для поліпшення якості клінкеру. У поєднанні з тривалим перебуванням при високій температурі це сприяє повному спалюванню палива. Залежно від родовища сировинного матеріалу від 1,5 до 6 г органічного вуглецю на кг клінкеру додається у процес з природним матеріалом. Дослідження різних сировинних сумішей показали, що 85-95% органічних сполук у сировинному матеріалі перетворюються в  $\text{CO}_2$  в присутності 3% кисню, але, в той же час, 5-15% перетворюється в  $\text{CO}$ . Кількість органічних вуглецевих сполук в цих умовах значно нижче 1%. Концентрація  $\text{CO}$  може бути вище 1000 мг/м<sup>3</sup>, перевищуючи 2000 мг/м<sup>3</sup> або навіть, у деяких випадках, вище 5000 мг/м<sup>3</sup>. Хороша конструкція системи подачі палива забезпечує стійкий рівень живлення твердим паливом з мінімальним піком викидів. В іншому

випадку при нестехіометрії горіння можуть з'явитися короткі піки викидів CO понад 0,5%. Це створює додаткові проблеми з електрофільтрами, які змушені автоматично вимикатися для уникнення вибуху.

Для зниження вмісту CO у відхідних пічних газах застосовують:

- вибір (за можливості) сировинних матеріалів з низьким вмістом органічного вуглецю;
- оптимізацію процесу випалу шляхом підтримки необхідного коефіцієнта надлишку повітря в печі;
- однорідний склад і властивості палива, рівномірність і постійність його подачі в піч;
- стабільний режим роботи печі, застосування автоматизованих систем управління роботою печі;
- безперервне автоматичне вимірювання CO в пічних газах за допомогою використання обладнання для моніторингу з коротким часом відгуку, розташованого поблизу джерела утворення CO.

Сьогодні викиди CO<sub>2</sub> під час виробництва цементу відбувається через високі температури (енергозатрати) та хімічні реакції. Теоретичний перехід на відновлювальні джерела енергії міг би підвищити екологічну чистоту цементу та бетону, але хімічні реакції залишаються все ж таки неподоланим бар'єром [3].

Раніше було багато спроб знизити вуглецевий слід хімічних реакцій під час виробництва цементу. Вапняк замінювали вулканічними породами, додавали діоксид титану, харчову соду, будівельне сміття і навіть глину. Більш того, є пропозиція використовувати як основу для будівельних матеріалів картопляний крохмаль. У новому дослідженні, результати якого опубліковані в журналі *Materials Letters*, у якості добавки запропоновано спеціальним способом оброблене деревне вугілля, що отримане під час спалювання біологічних відходів. Деревне вугілля й раніше пробували додавати у суміші для виготовлення цементу. На цей раз вугілля було попередньо оброблене стічними водами, що призвело до декількох позитивних результатів. По-перше, виготовлений бетон виявився міцнішим, по-друге – підготовлене для виготовлення цементу деревне вугілля змогло поглинути із навколишнього повітря вуглекислий газ у об'ємі до 23% від власної ваги.

Експериментальний цемент з 30% обробленого стічними водами деревного вугілля поглинув на 13 г більше CO<sub>2</sub>, ніж біло викинено при його виробництві. Для порівняння, звичайний цемент виділяє при виробництві до 900 г на

кожен кілограм. Різниця надзвичайно велика, що відкриває цікаві перспективи для нового матеріалу [3].

Вимірювання міцнісних характеристик бетону після 28 днів з моменту його виготовлення показало, що міцність бетону на стиск складає 27,6 МПа, що приблизно відповідає міцності звичайного бетону. Будинки із подібного матеріалу будуть такими ж міцними, які із звичайного бетону, але також зможуть десятиліттями поглинати CO<sub>2</sub> із атмосфери, а не тільки в процесі його виготовлення [3].

#### **Мета роботи та обґрунтування необхідності її виконання**

Мета роботи полягає у застосуванні розробленого способу та обладнання для зниження викидів шкідливих речовин з димових газів цементного виробництва шляхом отримання конденсату водяної пари та дослідження механічних характеристик цементного каменю отриманого з його використанням.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- використати розроблений спосіб та описати будову і принцип роботи обладнання для зниження викидів шкідливих речовин з димових газів цементного виробництва;
- провести експериментальні дослідження цементного каменю отриманого згідно запропонованого способу та обладнання для зниження викидів шкідливих речовин з димових газів цементного виробництва.

#### **Викладення основного матеріалу**

Виходячи із аналізу різноманітних способів зниження викидів шкідливих речовин при виробництві цементу, це питання сьогодні є надзвичайно актуальним. Слід зазначити, що до основних парникових газів в атмосфері Землі відносяться пари води (H<sub>2</sub>O), вуглекислий газ (CO<sub>2</sub>), закис азоту (N<sub>2</sub>O), метан (CH<sub>4</sub>), озон (O<sub>3</sub>), гексафторид сірки (SF<sub>6</sub>), гідрофторвуглецеві сполуки (ГФВ) і перфторвуглецеві сполуки (ПФВ) [4].

У статті пропонується із димових газів цементного виробництва вилучати водяну пару (отримати конденсат пари димових газів). Також у процесі отримання конденсату пари з димових газів будуть вилучені механічні мікрочастинки та інші сполуки шкідливих речовин. Ці речовини знаходяться у цьому конденсаті.

Для досягнення цієї мети розроблено "Спосіб виділення рідини і механічних домішок із газового потоку" особливості якого висвітлені у патенті на корисну модель [5]. Основною дачею запропонованого способу є підвищення

ефективності очищення газу (наприклад,  $\text{CO}_2$ ) у великих об'ємах від водяної пари та механічних домішок для забезпечення пропонованим способом екологічної безпеки.

Виділення з газового потоку високої температури  $+120\text{ }^\circ\text{C} \dots +160\text{ }^\circ\text{C}$  води і механічних частинок здійснюється в декілька етапів при мінімальних енерговитратах. На рисунку 1 показана функціональна схема пропонованого способу.

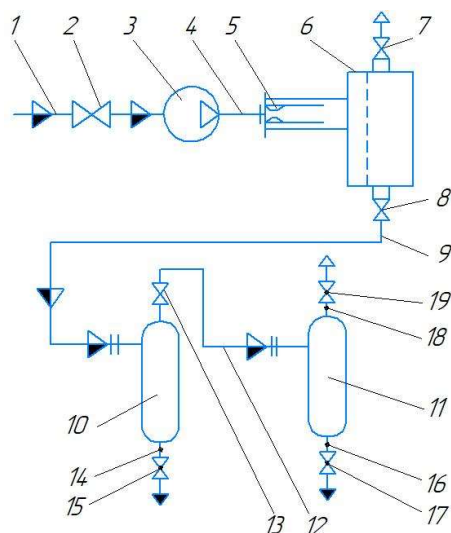


Рис. 1. Функціональна схема лабораторно-експериментальної установки для виділення рідини і механічних частинок з газового потоку:

- 1 – патрубок; 2 – запірний елемент; 3 – компресор;
- 4 – патрубок; 5 – сопловий охолоджувач;
- 6 – буферна камера; 7, 8 – запірний елемент;
- 9 – відвід; 10, 11 – сепаратор; 12 – патрубок;
- 13 – запірний елемент; 14 – зливний патрубок;
- 15 – запірний елемент; 16 – зливний патрубок;
- 17 – запірний елемент; 18 – патрубок; 19 – запірний елемент випуску очищеного газу

Спочатку гарячий газовий потік перед поступленням в буферну камеру охолоджується у сопловій камері (за рахунок надзвукової швидкості) де внаслідок охолодження пара перетворюється в дрібнодисперсні краплини рідини. Далі газорідний потік поступає в каскад сепараторів, де краплинна рідина і механічні частини осаджуються та виводяться через нижні вихідні патрубкі сепараторів, а очищений газ виводиться через верхній патрубок кінцевого сепаратора.

Залежно від способу охолодження димового газу можна також додатково очистити його від механічних домішок, пилу тощо. Конденсат пари димових газів потрібно в подальшому утилізувати або за можливості повторно використати у технологічному процесі.

Для реалізації пропонованого способу розроблено багатосопловий пристрій [6] та газорідний сепаратор із врахуванням складу та різних характеристик димових газів цементного виробництва. На рисунку 2 показано лабораторно-експериментальний газорідний сепаратор в процесі його досліджень, а на рисунку 3 – його принципову схему.



Рис. 2. Лабораторно-експериментальний газорідний сепаратор

Принцип роботи сепаратора наступний. Газорідна суміш потрапляє у вхідний патрубок 4, далі входячи у корпус сепаратора 1 змінює свій напрямок за рахунок дефлектора 7. При цьому відбувається закручування газорідного потоку та його тангенційний рух по внутрішній поверхні корпуса 1. При цьому, як за рахунок зміни напрямку руху та дії відцентрової сили, відбувається коагуляція краплин рідини та її відділення з газового потоку. Рідина, що відділилась на цих ступенях розділення, продовжує рух як тангенційно, так і стікає в днище 3 сепаратора. Для відбору рідини, що ще рухається тангенційно, передбачено дефлектор 8. Рідина у цьому дефлекторі зупиняється, коагулюється та під дією сили тяжіння стікає у днище 3. При цьому газ, який знаходиться ближче до центра осі сепаратора проходить у щілини 16, які утворені пластинами 15. На цих пластинах осідають краплини рідини які не були відділені на попередньому етапі. Ці краплини із пластин 15 стікають вниз і потрапляють на поверхню нижньої перегородки 11, і далі, рухаючись крізь щілину 23, також поступають у днище 3.

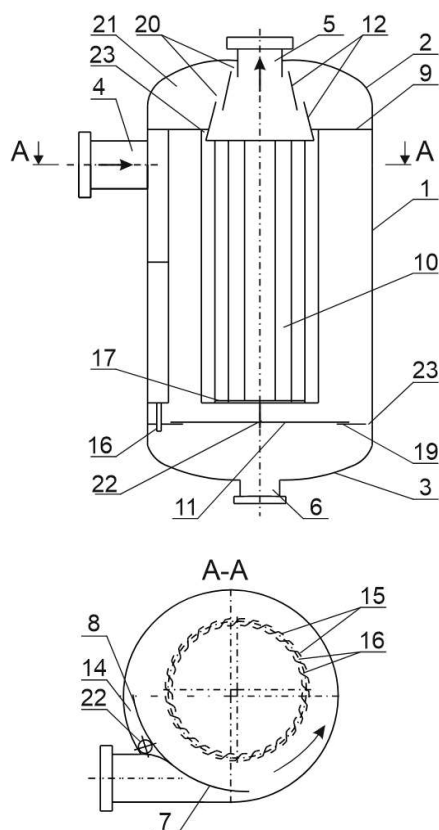


Рис. 3. Принципова схема газорідинного сепаратора:

- 1 – корпус; 2, 3 - днище; 4 – вхідний патрубок, 5 – вихідний патрубок; 6 – зливний патрубок; 7, 8 – дефлектор; 9 – перегородка; 10 – сепараційний пакет; 11 – перегородка нижня; 12 – нижній конфузор; 13 – верхній конфузор; 14, 23 – «кишені-уловлювачі»; 15 – пластини; 16 – щілини; 17 – нижній диск; 18 – напрямна вісь; 19 – кутник кріплення нижньої перегородки; 20 – кільцева щілина; 21 – камера; 22 – дренажна трубка; 24 – щілина між копусом і нижньою перегородкою

Легка рідинна плівка, що залишилася у кишені-уловлювачі 23, поступає разом з потоком суміші в зону вихідних конфузурів 12 і 13. Рухаючись у напрямку газового потоку вгору по поверхні конфузурів 12 і 13, рідина потрапляє в щілини 20, звідки осідає у верхній накопичувальній камері 21, з якої під дією гравітаційних сил за допомогою дренажної трубки 22 відводиться у нижню частину корпусу 1 сепаратора і потрапляє у днище 3. Очищений від рідини газ відводиться із сепаратора через вихідний патрубок 5, а зібрана на усіх ступенях рідина, що знаходиться у днищі 3 відбирається з сепаратора через зливний патрубок 6.

З метою утилізації отриманого конденсату пари з димових газів цементного виробництва пропонується використовувати його як сировину для отримання цементного каменю (додавати у

цементний розчин при виробництві бетону та виробів з нього).

Для визначення механічних характеристик цементного каменю (напруження згину  $\sigma_z$ , стиску  $\sigma_{ст}$  та крихкість КК) виготовленого із застосуванням конденсату пари димових газів цементного виробництва та їх порівняння із цементним каменем виготовленим за традиційним способом було виготовлено відповідні дослідні зразки. Визначення характеристик цементного каменю проводилось згідно ДСТУ Б В.2.7-86-99 [7].

Результати лабораторних досліджень цементних каменів наведені у таблиці.

Таблиця

Характеристики цементних каменів

№ з/п	Цементний камінь виготовлений на основі	Розтічність Р, мм	$\sigma_z$ , МПа	$\sigma_{ст}$ , МПа	Крихкість КК = $\sigma_{ст}/\sigma_z$	Тривалість формування, год
1	Конденсату пари димових газів (відстояний)	220	1,2	4,7	3,9	24
2	Конденсату пари димових газів (перемішаний)	215	1,3	4,6	3,5	
3	Водопровідної води	205	1,0	3,5	3,5	

Виходячи із отриманих результатів (табл.) найкращим за механічними властивостями є цементний камінь, отриманий із застосуванням конденсату пари димових газів. Варта зауважити, що перед виготовленням дослідних зразків вищезазначений конденсат пари перемішувався із наявним у ньому осадом. Отриманий цемент має більшу розтічність порівняно із цементом виготовленим на водопровідній воді, а цементний камінь вищі напруження згину на 30% та вищі на 31% напруження стиску. При цьому, крихкість цементного каменю виготовленого із перемішаного конденсату пари димових газів залишилась такою ж, як і у цементного каменю виготовленого з використанням водопровідної води.

**Висновки.** Технологічні процеси виробництва будівельних матеріалів, зокрема цементу, супроводжуються значними викидами шкідливих речовин у навколишнє середовище. З метою утилізації окремих видів шкідливих речовин, що

знаходяться у димових газах цементних виробництв, було розроблено обладнання та спосіб, який полягає у вилученні водяної пари (отримання конденсату пари димових газів). Варта зауважати, що окрім водяної пари, яка належить до парникових газів, розроблений спосіб дозволяє вилучати також механічні мікрочастинки та інші сполуки шкідливих речовин. Утилізація отриманого конденсату пари димових газів полягає у його застосуванні для виготовлення виробів із цементу.

Для визначення механічних характеристик цементного каменю (напруження згину  $\sigma_{zg}$ , стиску  $\sigma_{ст}$  та крихкості  $K_K$ ) виготовленого із застосуванням конденсату пари димових газів та їх порівняння із цементним каменем виготовленим за традиційним способом було виготовлено відповідні дослідні зразки та проведено експериментальні дослідження. Найкращими механічними властивостями володіє цементний камінь, отриманий із застосуванням конденсату пари димових газів. Отриманий цемент має більшу розтічність порівняно із цементом виготовленим на водопровідній воді, а цементний камінь – вищі напруження згину на 30% та вищі на 31% напруження стиску. При цьому, крихкість цементного каменю виготовленого із перемішаного конденсату пари димових газів залишилась такою ж, як і у цементного каменю виготовленого з використанням водопровідної води.

#### Л і т е р а т у р а

1. Довідник з ресурсоефективного та чистого виробництва. Цементна промисловість / с.в. Плашихін. – К.: Центр ресурсоефективного та чистого виробництва, 2020. – 96 с.
2. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control) / Joint Research Centre. Institute for Prospective Technological Studies Sustainable Production and Consumption Unit European IPPC Bureau. – 2013. – 501 p.
3. <https://toneto.net/news/tehnologii/uchyonie-sozdali-tsement--kotoriy-pogloshchaet-bolshe-uglekislogogaza--chem-vibrasivaetsya-pri-ego-proizvodstve>
4. <http://surl.li/kxpwo>
5. Патент на корисну модель № 152837, Україна, В03С 3/02. Спосіб виділення рідини і механічних частинок з газового потоку / Патентовласник Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу (UA), вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019 (UA) // Крижанівський Є.І. (UA); Лях М. М. (UA); Михайлюк В. В. (UA); Маковійчук М.В. (UA); Кучірка Ю.М. (UA); Витриховський Є.А. (UA) – u202200306; Заявл. 25.01.2022; Опубл. 19.04.2023, Бюл. № 16. – 4 с.
6. Лях М.М., Михайлюк В.В., Яцишин Т.М., Витриховський Є.А. (2022). Дослідження впливу геометричних параметрів сопла Лавалля на зміну температури потоку газу. Прикарпатський вісник наукового товариства імені Шевченка. Число, 17(64), 108-117. [https://doi.org/10.31471/2304-7399-2022-17\(64\)-108-117](https://doi.org/10.31471/2304-7399-2022-17(64)-108-117)
7. ДСТУ Б В.2.7-86-99. Цементи тампонажні. Методи випробувань (ГОСТ 26798.1-96)

#### References

1. Dovidnyk z resursoefektyvnoho ta chystoho vyrobnytstva. Tsementna promyslovisht' / s.v. Pla-shykhin. – K.: Tsent'r resursoefektyvnoho ta chystoho vyrobnytstva, 2020. – 96 p.
2. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control) / Joint Research Centre. Institute for Prospective Technological Studies Sustainable Production and Consumption Unit European IPPC Bureau. – 2013. – 501 p.
3. <https://toneto.net/news/tehnologii/uchyonie-sozdali-tsement--kotoriy-pogloshchaet-bolshe-uglekislogogaza--chem-vibrasivaetsya-pri-ego-proizvodstve>
4. <http://surl.li/kxpwo>
5. Patent na korysnu model № 152837, Ukraina, V03S 3/02. Sposib vydilennia ridyny i me-khanichnykh chastynok z hazovoho potoku / Patentovlasnyk Ivano-frankivskiy natsionalnyi tekhnichnyi universytet nafty i hazu (UA), vul. Karpatska, 15, m. Ivano-Frankivsk, 76019 (UA) // Kryzhanivskiy Ye.I. (UA); Liakh M. M. (UA); Mykhailiuk V. V. (UA); Makoviichuk M.V. (UA); Kuchirka Yu.M. (UA); Vytrykhovskiy Ye.A. (UA) – u202200306; Zaiavl. 25.01.2022; Opubl. 19.04.2023, Biul. № 16. – 4 p.
6. Liakh M.M., Mykhailiuk V.V., Yatsyshyn T.M., Vytrykhovskiy Ye.A. (2022). Doslidzhennia vplyvu heometrychnykh parametriv sopla Lavalia na zminu temperatury potoku hazu. Prykarpatskyi visnyk naukovo-ho tovarystva imeni Shevchenka. Chyslo, 17(64), 108-117. [https://doi.org/10.31471/2304-7399-2022-17\(64\)-108-117](https://doi.org/10.31471/2304-7399-2022-17(64)-108-117)
7. DSTU B V.2.7-86-99. Tsementy tamponazhni. Metody vyprobuvan (GOST 26798.1-96)

#### **Mykhailiuk V.V. Laboratory experimental installation for obtaining flue gas condensate and its disposal**

Currently, cement is one of the main building materials used in the construction of various engineering structures and structures. The technological process of cement production is multi-stage and requires a high production culture to ensure environmental safety. The

*full cycle of commercial cement production has a negative impact on the environment: global warming (due to greenhouse gas emissions), ocean acidification (mainly due to emissions of carbon, nitrogen, and sulfur oxides), land degradation (due to heavy metal contamination). There are various ways of making cement, which differ technologically and usually have different effects on the environment. Therefore, it remains important to study the main types of emissions during cement production and measures to reduce or eliminate their impact on the environment. The main problems during the production of cement are the reduction of emissions of water vapor, dust, nitrogen oxides  $NO_x$ , sulfur dioxide, oxide and carbon dioxide. Various equipment are used to clean or reduce such pollution: electrostatic precipitators, bag filters, hybrid filters, wet scrubbers, etc. However, the use of the above-mentioned equipment does not completely eliminate harmful emissions during cement production. The work proposes a method and equipment for reducing the emissions of harmful substances from the flue gases of cement production - a method of separating liquid and mechanical impurities from the gas flow. The main task of the proposed method is to increase the efficiency of gas purification in large volumes from water vapor and mechanical impurities to ensure environmental safety,*

*which consists in extracting water vapor (obtaining flue gas vapor condensate). In order to dispose of the condensate of flue gases, it is proposed to use it in the production of concrete. Experimental studies of cement stone obtained using the steam condensate of cement production flue gases have been carried out. At the same time, the mechanical characteristics of the obtained cement stone (flexural stress  $\sigma_{\text{з}}$ , compression  $\sigma_{\text{см}}$  and fragility  $K_{\text{к}}$ ) were determined and compared with the cement stone produced by the traditional method. It was established that the best mechanical properties are the cement stone obtained with the use of condensate of flue gas steam.*

**Key words:** *cement, harmful emissions, gas-liquid separator, flue gas vapor condensate, cement stone, concrete, disposal*

**Михайлюк Василь Володимирович** к. т. н., доцент кафедри нафтогазових машин та обладнання Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Стаття подана 09.10.2023.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2023-279-3-25-30>

УДК 004.92[621:744]

## ІНЖЕНЕРНА ГРАФІКА ЯК «АЗБУКА КОНСТРУЮВАННЯ» В МАШИНОБУДІВНОМУ КРЕСЛЕННІ

Карпюк Л. В., Давіденко Н. О., Лорія М. Г., Гурін О. М.

## ENGINEERING GRAPHICS AS «THE ALPHABET OF DESIGN» IN MECHANICAL DRAWING

Karpyuk L. V., Davydenko N. O., Loria M. G., Gurin O. M.

У статті розглядаються основні проблеми, з якими стикаються студенти графічних дисциплін у технічному ВНЗ. Автори діляться педагогічними спостереженнями про труднощі, що виникають у студентів у розділенні понять проєкційного креслення і машинобудівного. Запропоновано шляхи їх вирішення: систематизація навчального матеріалу, способи взаємопов'язувати конструкторську документацію, методи виявлення форм деталей на креслениках, логічне обґрунтування проставлення розмірів, використання умовностей. У статті також викладається роль інженерної графіки у подальшому придбанні навичок у проєктуванні. Назва дисципліни поєднала традиційні дисципліни «Нарисна геометрія» та «Комп'ютерна графіка», пов'язані з використанням обчислювальної техніки для побудови зображень. Таке об'єднання дисциплін дозволило скоротити загальну кількість найменувань предметів, що вивчаються у навчальних закладах. Інженерна графіка, її методи та положення застосовуються майже у всіх галузях науки та техніки. Вона вивчає питання зображення просторових форм на площині та питання конструювання графічних моделей просторових форм. Інженерна графіка готує до конструювання графічні моделі реально існуючих тривимірних просторових форм, що оточують людину у повсякденній практичній діяльності. Також вона включає елементи нарисної геометрії (теоретичні основи побудови креслеників геометричних фігур), технічного креслення (складання креслеників виробів) та машинної графіки. Основним завданням інженерної графіки є вивчення законів зображення технічних форм. Іншими словами, інженерна графіка вчить читати і конструювати та будувати кресленики. Основне завдання курсу інженерної графіки – навчити студентів правильно зображати на кресленку прості форми та читати кресленики цих виробів – визначає

роль, місце та зміст цього курсу як навчальної дисципліни. В результаті вивчення інженерної графіки студент повинен отримати знання, вміння та навички, які знадобляться інженеру для викладу технічної думки за допомогою кресленика, а також для розуміння за креслеником конструкції та принципу дії зображеного виробу. У сучасному світі актуальність таких професій як технік-технолог, технік-конструктор, технік-електромеханік, технік-електронік, майстер, начальник цеху активно зростає, ці фахівці затребувані на ринку праці. Для підготовки даних спеціалістів необхідне знання «азбуки конструювання» – це, насамперед, інженерної графіки. Конструктор повинен вміти добре креслити, виконувати складні графічні побудови, чітко представляти в просторі графічну роботу, яку виконує.

**Ключові слова:** інженерна графіка, умовності, проєкції, конструювання, геометрія, кресленик, креслення.

**Вступ.** Інженерна графіка, що включає дисципліну «Нарисна геометрія» в якості теоретичного ядра, є однією з базових навчальних дисциплін інженерної освіти, що дає знання в галузі геометричного моделювання, способів відображення і перетворення геометричних фігур і технічних форм, вміння та навички створення та оформлення конструкторської документації. На сучасному етапі цю дисципліну можна розглядати як технологію візуального представлення та вираження когнітивного процесу інженерної та наукової діяльності, як метод графічної ілюстрації та інтерпретації технічних та наукових текстів.

В даний час як одна з освітніх технологій, починаючи зі шкільних ступенів, активно застосовується метод проєктів, який успішно вирішує не тільки навчальні, а й виховні завдання. Проєкт перекладу – «кинутий вперед», а проєктування – процес створення проєкту. Метод проєктів – це спільна креативна та продуктивна діяльність викладача та учнів, спрямована на пошук вирішення проблеми, що виникла. В основі цієї освітньої технології лежать ідеї американських філософів Дьюї, Лая, Торндайка про те, що освіта є процесом накопичення та реконструкції вже наявного досвіду з метою поглиблення його змісту.

Інженерна графіка є першою технічною дисципліною, при вивченні якої студент ознайомлюється з технічною термінологією, широким колом технічних понять, питаннями конструювання та технологій виготовлення машин та іншими спеціальними відомостями. Однак знань правил і прийомів нарисної геометрії та проєкційного креслення, що набуваються на початку курсу інженерної графіки виявляється недостатнім для машинобудівного креслення та застосування спрощень та умовностей креслення машин їх вузлів, деталей, пристосувань, металевих конструкцій тощо.

**Викладення основного матеріалу.** У техніці, машинобудуванні зображення отримують за допомогою особливого процесу, який називають проєктуванням. Таким чином, отримані зображення на ім'я цього процесу називають проєкціями. У цьому сенсі не тільки нарисну геометрію та проєкційне креслення, а й машинобудівне креслення, що викладається у ВНЗ, можна називати геометрією проєкцій.

Отже, наша наука відкриває можливості, досліджуючи зображення (або, іншими словами, вміння на них вирішувати позиційні та метричні завдання), тим самим судити про позиційні та метричні властивості оригіналу в просторі, тобто тривимірного образу по двовимірному образу, отриманого в результаті проєктування [1].

Такий підхід до справи був запропонований свого часу Гаспаром Монжем, який зображував не реальні об'єкти, а лише їхні геометричні моделі, що складаються з найпростіших геометричних образів: з точок, прямих, площин, поверхонь. Отже, інженер завжди реальний виріб, точніше його поверхню, може подати у вигляді поєднання цих найпростіших образів і вирішити всі геометричні завдання поверхні цього об'єкта. Після чого він зможе вирішувати й інші інженерні завдання: яку надати цій поверхні внутрішню фактуру, з якого матеріалу виготовити,

розрахувати характеристики та деформаційні характеристики і т.д.

До будь-якого робочого кресленика пред'являються дві основні вимоги: можливість представлення деталі і можливість виготовлення даної деталі за креслеником. Якщо в курсі нарисної геометрії або проєкційного креслення достатньо виконання першої вимоги, то в наступному курсі машинобудівного креслення необхідно дотримання обох вимог. Причому, основним є друге - можливість виготовлення, перевірки після виготовлення, що часто викликає труднощі сприйняття у студентів, які зазвичай не мають виробничих навичок.

Елементарний, але важливий факт, що є основою двох видів діяльності інженера. Пряме завдання нарисної геометрії є геометричним аналогом, принциповим елементом майбутньої конструкторської діяльності. А зворотнє: представимо діяльність технолога - він не створює кресленик виробу, він повинен організувати його виготовлення так, щоб люди, виконавці, робітники, техніки на обладнанні відрізали, свердлили, робили технологічні операції за цими розмірами кресленика. Отже, кресленик організує працю як конструктора, так і технолога, оскільки він за креслеником читає документацію і організує роботу устаткування. Проте навчальні кресленики з курсу «Інженерна графіка» складають студенти, які ще не вивчили цілого ряду загальноінженерних дисциплін. [2].

Якщо ми звернемося до діяльності конструктора чи діяльності технолога, ми побачимо, що вони вирішують або пряме, або зворотнє завдання геометрії, лише у складніших ситуаціях. Хороший інженер - він завжди грамотний конструктор та грамотний технолог. А це і є завдання навчання студентів – підготовка до інженерної діяльності висококласних, конкурентоспроможних фахівців, які потрібні на ринку інтелектуальної праці, які зможуть зробити свій внесок у розвиток економіки країни. [3].

В даний час прийнято керуватися правилом: якщо проєкція, що намічається, має більше одного рішення, вона необхідна [4]. Наприклад, при двох зображеннях деталі, що має форму паралелепіпеда, потрібно третє, інакше форма не буде однозначно визначена. Відповідно до цього правила чотиригранні призми вимагають подання трьома проєкціями або однією проєкцією та перетином.

Для визначення необхідності виконання тієї чи іншої проєкції слід оцінити можливість виготовлення деталі за креслеником, тобто можливість представлення найбільш простого

зображення, чіткого показу розмірів, обробки та інших технічних вказівок навіть при повному проєкційному прочитанні форми. Для цього доводиться вдаватися до деяких штучних прийомів. Історично, з розвитком креслення, стало більше інформації, що передається, на їх виконання стало йти більше часу. Відповідно, кресленики стали поступово спрощувати, застосовуючи різні умовності, написи та інше [5].

А як справи в машинобудівному кресленні? З'являється поняття конструкторської документації процесу проєктування виробів, а саме створення ескізного проєкту виробу, технічного проєкту, робочих креслеників деталей [6].

Наприклад, створення кресленика вентиля (рис. 1). На етапі технічної пропозиції має бути вирішено безліч питань про конструкцію вентиля (рис. 2), принцип його роботи, складові, габарити, нарешті, його вартість. Звідси виникають питання, які вирішує конструктор, а потім технолог, але в курсі проєкційного креслення такі аспекти не розглядаються.



Рис. 1. Вентиль

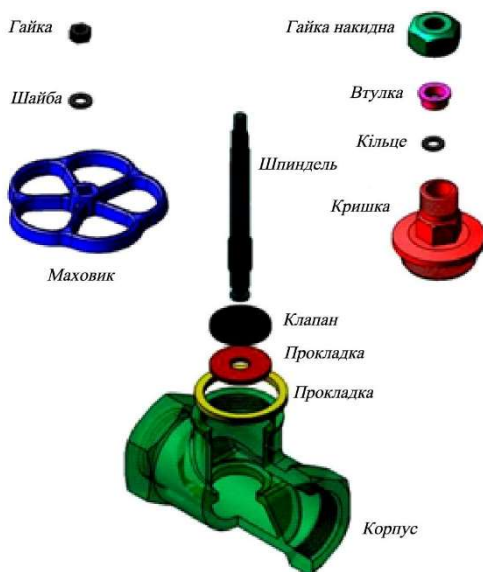


Рис. 2. Деталі, які входять до складу вентиля

На етапах ескізного проєкту та технічного вирішуються питання, що стосуються змісту конкретного втілення кожного виробу, що входить до цієї складальної одиниці. Наприклад, на робочому кресленнику корпусу вентиля головне зображення вибирається, виходячи з того, як цей корпус розташований у робочому положенні (вертикально, горизонтально). Такі деталі, як вали, шпинделі, шатуни, гвинти ходові, виходячи з умов обробки, переважно зображують з віссю, паралельною основному напису. Плоскі деталі вимагають одного зображення - контурного обрису деталі, а друге зображення, де має бути показана товщина деталі, замінює рядкова літера *s*, включена до розміру. При виборі кількості зображень, наприклад, шпинделя, що має циліндричну форму, достатньо головного виду та знака діаметра, при цьому керуємося стандартами.

Виконання складального кресленика починають з викреслювання корпусу вентиля. Потім креслиться клапан, який повинен закрити отвір в корпусі. Наступним етапом виконується з'єднання клапана із штоком. Після цього викреслюється штуцер так, щоб він з'єднався за допомогою внутрішньої різьби зі штоком і зовнішньої різьби з корпусом. Наступний етап – набивка і втулка. Гайку накидну виконують з'єднанням на різьбі зі штуцером. Після виконання зображення наносять розміри. Проставляють номери позицій в тій послідовності, в якій вони записані в специфікації. Тому специфікацію потрібно заповнювати до простановки позицій на складальному кресленнику.

Згідно з вимогами стандартів Єдиної системи конструкторської документації складальні кресленики необхідно виконувати зі спрощеннями.

На складальних кресленниках допускається не показувати:

- фаски, галтелі, скруглення, отвори, проточки, поглиблення, виступи, накатки, насічки та інші дрібні елементи;
- принципово незначні зазори між стрижнями і стінками отворів;
- написи на шкалах, табличках, планках, тощо, зображуючи лише їх контур;
- видимі складові частини виробів та їх елементів, які розміщені за пружиною;
- різноманітні кришки, кожухи, перегородки, рукоятки (наприклад, пробкових кранів), маховики – коли потрібно показати, що за ними знаходяться частини виробу. При цьому на зображенні роблять напис типу «Кришку поз. 5 не показано». Згадану кришку зображують окремо з позначенням «А поз. 5»;

– шайби, пластини, тощо із товщиною до 2 мм на кресленні зображують однією суцільною товстою основною лінією.

В багатьох випадках при виконанні розрізів на складальних кресленнях в січну площину потрапляють такі деталі, як болти, шпильки, шпонки, шпindelі, рукоятки та ін. На продольному розрізі такі деталі показують умовно нерозсіченими. В поперечному розрізі ці деталі розрізають і заштриховують. Кульки завжди показують нерозсіченими. Як правило, нерозсіченими показують гайки і шайби.

За складальним кресленням виріб збирають з окремих деталей, виготовлених раніше. Тому розміри окремих деталей на складальному кресленні не потрібні і їх не наносять. На ньому потрібні лише ті розміри, які визначають правильне розміщення деталей у виробі, розміри поверхонь чи елементів, якими приєднують складальну одиницю до інших виробів. На всіх складальних кресленнях наносять розміри, які визначають найбільші довжину, висоту і ширину виробу, тобто габаритні розміри.

Однак умовності і спрощення, що встановлюються правилами, не можуть забезпечити все різноманіття ситуацій, що виникають, тому при виборі виявлення форми слід спиратися на такі основні положення.

По-перше, вірність прийому виявлення на кресленні, вибір основного зображення визначається можливістю подумки однозначно уявити форму об'єкта. Зрозуміло, креслення при цьому має бути загальнозрозумілим, що не допускає різночитань та відповідним сучасним вимогам стандартів.

По-друге, проекція або її частина на кресленні не обов'язкова, якщо її відсутність не перешкоджає чіткому проставлянню розмірів та технічних вказівок. Тобто, додаткові проекції або винесені перерізи для більш повного і точного показу розмірів та обробки необхідні навіть при проекційній визначеності даної деталі [7].

По-третє, кількісна достатність інформації може контролюватись відсутністю повторення видів, розрізів, перерізів, розмірів та інших написів і умовних знаків, тобто може служити підтвердженням ідентичності непоказаних елементів. Наприклад, за наявності кількох рівномірно розташованих елементів предмета (зубці колеса механізму і отворів на ньому) показують один-два таких елементи, а інші зображують спрощено або умовно, але так, щоб була збережена ясність розташування всіх елементів [2].

Із деталей, які входять до складу вентиля, розглянемо, як приклад, гайку накидну (рис. 3).

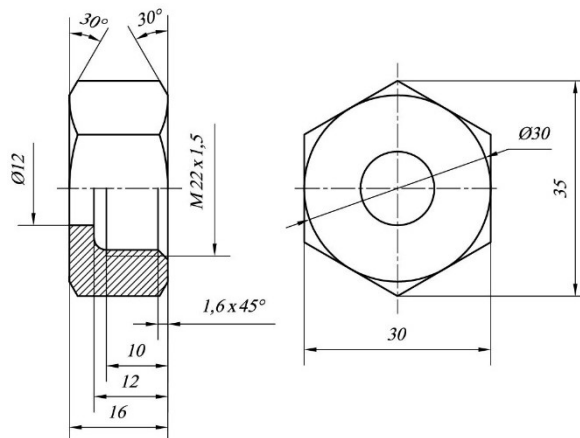


Рис. 3. Креслення деталі «Гайка накидна»

Найбільшу інформацію про поверхню дає проекція, на яку шестигранник проєктується трьома гранями. Також на головному зображенні виявляється утворююча фаски. Для виявлення форм деталі виконується і проекція, де шестигранна призма проєктується в шестикутник. Найбільша кількість поверхонь гайки отримана точенням, тому вісь розташовується паралельно основному напису. Для виявлення внутрішнього пристрою застосовується передній розріз.

**Результати.** Аналізуючи прийоми проставлення розмірів на робочих кресленнях, слід згадати: паралельність прямих, а також концентричність кривих для різних ліній (контурних, осевих тощо) розмірами можна не підтверджувати, прямий кут (перпендикулярність прямих) або розподіл кола на рівні частини також підтверджувати необов'язково. При виконанні складальних креслень виникає питання про пов'язані розміри, що забезпечують з'єднання деталей і роботу всього виробу та безліч інших питань, пов'язаних з виконанням конструкторської документації. Аналіз головних умовностей розрізів, перерізів, знака діаметра, недомовленостей та спрощених зображень допомагає отримати низку необхідних у практиці креслення результатів.

- Розріз, виконаний будь-якою кількістю січних площин або циліндричних поверхонь, буде вірним, якщо він не приведе до появи ліній, що не існують при даному напрямку проєктування до розрізу.

- Знаки при розмірах діаметра потрібно розуміти не лише як знаки, що підтверджують кола, а головним чином як знаки, що замінюють проекції. Проекції у вигляді концентричних кіл на робочих кресленнях не мають сенсу,

оскільки їх цілком замінюють знаки діаметра при розмірах діаметра.

- Знак діаметра є головною умовністю, тобто умовністю, від якої практика креслення ніколи і в жодній країні не відмовиться. Усі хорди кола, що проходять через центр, називають словом «діаметр», яке замінюють знаком. Також називають прямою, що проходить через центр сфери та з'єднує її протилежні точки. У машинобудуванні поверхні обертання мають широке застосування (80 – 90 % всіх кривих поверхонь), тоді як квадрати трапляються відносно рідко. Знак діаметра не можна прирівнювати за значенням до знаку квадрата при розмірах квадрата так як: знак діаметр замінює собою проєкцію і полегшує постановку технічних вказівок на кресленнях, в той час як відсутність другої проєкції не дозволяє поставити різну чистоту поверхні на різних гранях квадрата.

- З практичної точки зору на кресленнях деталей об'єднання половини виду з половиною розрізу для симетричних проєкцій можна допускати тільки в тих випадках, коли при складанні і читанні креслення обійтися без зовнішнього вигляду неможливо. Наприклад, зображати половину виду і половину розрізу для шківів або втулки безглуздо, оскільки таке об'єднання може призвести до труднощів при проставленні розмірів, обробки та інших технічних вказівок.

Призначення розрізу, наведене у стандарті, є неповним, тому у навчальних цілях його слід замінити таким:

- розрізи, як і інші головні умовності машинобудівного креслення (перетину, знак діаметра, недомовленості та спрощення), служать для поліпшення звичайних проєкцій. Зокрема, для заміни необхідних, але невидимих штрихових ліній суцільними;

- видалення частин деталі, виявлених іншими проєкціями; видалення з проєкцій спотворених геометричних форм та складних побудов ліній переходу;

- для об'єднання на одній проєкції двох напрямків проєктування без спотворення геометричних форм і без зниження зручності проставлення розмірів та інших технічних вказівок.

**Висновки.** В результаті вивчення курсу інженерної графіки студент повинен розуміти основні правила створення креслень, вміти оцінити компоновку креслення, розглянути кількість проєкцій, простежити правильність розміщення розмірів. Це і є так званою «азбукою конструювання». Машинобудівне креслення, на сьогоднішній день, необхідне студентам, оскільки дозволяє розуміти та виконувати будь-які

машинобудівні креслення та самостійно розбиратися у всій технічній документації, що відноситься до креслення. Особливого значення набуває вивчення стандартів креслень, які створюють єдність в оформленні креслень та забезпечують тісний зв'язок між вивченням у ВНЗ та тим, що застосовується на практиці.

#### Л і т е р а т у р а

1. Кривцов В. В., Козяр М. М. Нарисна геометрія (базовий курс) : навч. посібник. Рівне : НУВГП, 2019. 234 с.
2. Боголюбов С. К. Инженерная графика: Учебник для средних специальных учебных заведений / С. К. Боголюбов. 3-е изд., испр. и дополн. М.: Машиностроение, 2002. 352 с.
3. Карпюк Л. В., Давіденко Н. О. Просторове мислення студентів при вивченні графічних дисциплін. ВІСНИК СХУ ім. В. Даля № 2 (272). 2022. С. 23 – 28.
4. Карпюк Л. В., Гуліда М. І., Ревенко С. А. Комп'ютерна графіка в машинобудівних кресленнях: Навч. посібник. Луганськ: Вид-во Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2007. 132 с.
5. Фролов С. А., Воинов А. В., Феоктистова Е. Д. Машиностроительное черчение. М.: Машиностроение. 1981. 304 с.
6. Ботвинников А. Д. Черчение: учеб. для общеобразоват. учреждений / А. Д. Ботвинников, В. Н. Виноградов, И. С. Вышнепольский. 4-е изд., дораб. М.: АСТ: Астрель, 2008. 221 с.
7. ДСТУ ГОСТ 2.307:2013 Единая система конструкторской документации. Нанесение размеров и предельных отклонений. Чинний від 2013-12-11. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2013. 30 с.

#### References

1. Krivtsov V. V., Koziar M. M. Narysna heo-metriia (bazovyi kurs) : navch. posibnyk. Rivne : NUVHP, 2019. 234 s.
2. Boholiubov S. K. Ynzhenernaia hrafyka: Uchebnyk dlia srednykh spetsyalnykh uchebnykh za-vedenyi / S. K. Boholiubov. 3-e yzd., yspr. y dopoln. M.: Mashynostroeny, 2002. 352 s.
3. Karpiuk L. V., Davidenko N. O. Prostorove myslennia studentiv pry vyvchenni hrafichnykh dystsyplin. VISNYK SNU im. V. Dalia № 2 (272). 2022. S. 23 – 28.
4. Karpiuk L. V., Hulida M. I., Revenko S. A. Komp'uterna hrafika v mashynobudivnykh kresleniakh: Navch. posibnyk. Luhansk: Vyd-vo Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia. 2007. 132 s.
5. Frolov S. A., Voynov A. V., Feoktystova E. D. Mashynostroytelnoe cherchenye. M.: Ma-shynostroeny. 1981. 304 s.

6. Botvynnykov A. D. *Cherchenye: ucheb. dlia obshcheobrazovat. uchrezhdenyi* / A. D. Botvynnykov, V. N. Vynohradov, Y. S. Vushnepolskyi. 4-e yzd., dorab. M.: ACT: Astrel, 2008. 221 s.
7. DSTU HOST 2.307:2013 *Edynaia systema konstruktorskoï dokumentatsyy. Nanesenye raz-merov y predelnukh otkloneniy. Chynnyi vid 2013-12-11. Vyd. ofits. Kyiv : UkrNDNTs, 2013. 30 s.*

**Karpyuk L. V., Davydenko N. O., Loria M. G., Gurin O. M. Engineering graphics as «the alphabet of design» in mechanical drawing**

*The article examines the main problems faced by students of graphic disciplines at a technical university. The authors share pedagogical observations about the difficulties students have in separating the concepts of projection drawing and mechanical engineering. Ways to solve them are proposed: systematization of educational material, methods of interlinking design documentation, methods of identifying the forms of details on drawings, logical justification of setting dimensions, use of conventions. The article also describes the role of engineering graphics in the further acquisition of design skills. The name of the discipline combined the traditional disciplines «Descriptive Geometry» and «Computer Graphics», related to the use of computer technology for the construction of images. Such unification of disciplines made it possible to reduce the total number of subjects studied names in educational institutions. Engineering graphics, its methods and provisions are used in almost all fields of science and technology. She studies the issue of depicting spatial forms on a plane and the issue of constructing graphic models of spatial forms. Engineering graphics prepares for construction graphic models of actually existing three-dimensional spatial forms that surround a person in everyday practical activities. It also includes elements of sketch geometry (theoretical foundations of drawing drawings of geometric figures), technical drawing (compilation of drawings of products) and machine graphics. The main task of engineering graphics is the study of the laws of the technical forms representation. In other words, engineering graphics teaches you to read and design and build blueprints. The main task of the engineering graphics course is*

*to teach students to correctly depict simple products on a drawing and to read the drawings of these products. It determines the role, place and content of this course as an educational discipline. As a result of studying engineering graphics, a student should acquire the knowledge, skills and abilities that an engineer will need to express a technical opinion with the help of a drawing, as well as to understand the design and operation principle of the depicted product from the drawing. In today's world, the relevance of such professions as technology technician, design technician, electromechanical technician, electronics technician, foreman, shop manager is actively growing, these specialists are in demand on the labor market. For the preparation of these specialists, knowledge of the «alphabet of construction» is required. It is, first of all, engineering graphics. The designer must be able to draw well, perform complex graphic constructions, clearly present the graphic work he performs in space.*

**Keywords:** *engineering graphics, conventions, projections, construction, geometry, draftsman, drawing.*

**Карпюк Людмила Вікторівна**, старший викладач кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, [karp224@gmail.com](mailto:karp224@gmail.com)

**Давіденко Наталія Олександрівна**, старший викладач кафедри іноземних мов та професійної комунікації, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, [nat.davidenko11@gmail.com](mailto:nat.davidenko11@gmail.com)

**Лорія Марина Геннадіївна**, д.т.н., професор, в.о. завідувача кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, [m\\_loria@snu.edu.ua](mailto:m_loria@snu.edu.ua)

**Гурін Олександр Миколайович**, аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, [gurin@ukr.net](mailto:gurin@ukr.net)

Стаття подана 19.10.2023.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2023-279-3-31-36>

УДК 681.322

## МОДЕЛЮВАННЯ ЛІНІЙНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ З ЗВОРОТНИМ ПОШИРЕННЯМ ПОМИЛКИ ДЛЯ ОСНОВНИХ КАНАЛІВ КЕРУВАННЯ РЕАКТОРОМ СИНТЕЗУ ОЦТОВОЇ КИСЛОТИ

Поркуян О.В., Самойлова Ж.Г.

## MODELING OF A LINEAR NEURAL NETWORK WITH INVERSE ERROR PROPAGATION FOR THE MAIN CHANNELS OF ACETIC ACID SYNTHESIS REACTOR CONTROL

Porkuyan O.V., Samojlova Zh.G.

*В наш час для управління технологічними об'єктами можуть бути використані нейронні мережі, нечітка логіка чи генетичні алгоритми. Було небагато спроб використати технології штучного інтелекту для побудови автоматичних систем керування.*

*Однак тільки в останні роки, зі зростанням досліджень у галузі нелінійного управління, використання технологій штучного інтелекту в керуванні технологічними процесами набуло широкого поширення.*

*Моделювання та дослідження роботи штучних нейронних мереж можна проводити за допомогою програмних симуляторів. Найбільш поширеними пакетами для моделювання властивостей нейромереж є Neural Works Pro Plus, Neuro Solution, Matlab (Neural Network Toolbox), Neuro Wisard, ANsim, Neural Ware та інші. Програми відрізняються складністю, кількістю типів нейронів та алгоритмів навчання, що підтримуються в системі.*

*У статті досліджується побудова лінійних нейронних мереж із зворотним розповсюдженням помилки для основних каналів управління реактора синтезу оцтової кислоти.*

*Для побудови та дослідження властивостей нейронної мережі використовувалися статистичні дані реактора синтезу оцтової кислоти у стаціонарному режимі цеху оцтової кислоти Северодонецького ЗАО «Азот». Для моделювання використовувалося середовище програмного симулятора MATLAB 2021. Ця програма рекомендована для моделювання різних нейронних мереж із різною кількістю нейронів і різним типом функції активації. Для побудови нейронної мережі використовувалася ітераційна процедура.*

*Архітектура нейронної мережі: перший шар містить спочатку 9 нейронів, потім 23 нейрона, а*

*згодом 46 нейронів з функцією активації *tansig*. Другий шар містить один нейрон з функцією активації *purelin*. Діапазон зміни входу [8900-9800].*

*Навчання нейронної мережі виконувалося протягом 50 циклів. Потім виконувалося моделювання мережі. Наприкінці моделювання розраховували відносну похибку для виходу мережі.*

*У тому випадку, якщо залежності мають лінійний характер для апроксимації даних можна використовувати лінійні нейронні мережі з зворотнім поширенням помилки. Всі створені та промодельовані нейронні мережі для всіх основних каналів керування показали задовільну якість апроксимації даних. Якість апроксимації даних складала во всіх випадках менше 1%. Це дозволить використовувати нейромережі для управління технологічними процесами синтезу оцтової кислоти та перспективність подальших досліджень цього напрямку.*

**Ключові слова:** нейронні мережі, зворотне поширення помилки, реактор

**Вступ.** Для керування складними системами необхідно побудувати модель, яка адекватно відображає властивості об'єкта керування. У багатьох випадках параметри такої моделі визначаються безпосередньо в процесі експлуатації об'єкта, тобто здійснюється ідентифікація за випадковими вхідними та вихідними сигналами. В наш час досить активно розвивається спосіб побудови автоматизованих систем керування на основі використання технологій штучного інтелекту (нейронні мережі, нечітка логіка, генетичні алгоритми) [1-6]. Завдяки хорошим

можливостям моделювання нейронні мережі широко використовуються в ряді програм хімічної технології, таких як аналіз даних датчиків, виявлення несправностей та ідентифікація нелінійних процесів. Однак тільки в останні роки, зі зростанням досліджень у галузі нелінійного управління, його використання в керуванні технологічними процесами набуло широкого поширення. Відомо небагато спроб використання в хімічній промисловості технологій штучного інтелекту [7-12].

Моделювання та дослідження роботи штучних нейронних мереж можна проводити за допомогою програмних симуляторів. Найбільш поширеними пакетами для моделювання властивостей нейромереж є Neural Works Pro Plus, Neuro Solution, Matlab (Neural Network Toolbox), Neuro Wisard, ANsim, Neural Ware та інші. Програми відрізняються складністю, кількістю типів нейронів та алгоритмів навчання, що підтримуються в системі.

У цій роботі для побудови та дослідження властивостей нейронної мережі використовувалися статистичні дані реактора синтезу оцтової кислоти у стаціонарному режимі цеху оцтової кислоти Сєверодонецького ЗАО «Азот». Для моделювання використовувалося середовище програмного симулятора MATLAB 2021. Ця програма рекомендована для моделювання різних нейронних мереж із різною кількістю нейронів і різним типом функції активації.

Структурно-логічна схема реактора синтезу оцтової кислоти була досліджена в роботі [13] і показана на рисунку 1.

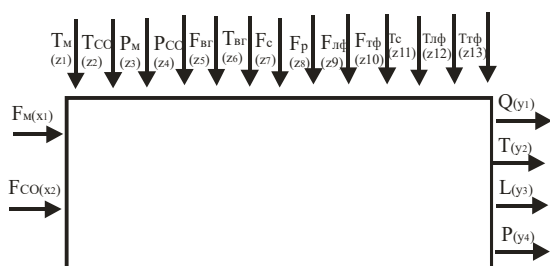


Рис. 1. Структурна схема реактору

Вихідними координатами реактору синтезу як об'єкту керування є:

- тиск в реакторі  $P$ ;
- рівень в реакторі  $L$ ;
- температура реакції синтезу  $T$ ;
- концентрація оцтової кислоти в реакційній рідині  $Q$ .

Вхідними координатами реактору синтезу як об'єкту керування є:

- витрата метанолу  $F_M$ ;
- витрата оксиду вуглецю  $F_{CO}$ ;

До збурюючих координат слід віднести:

- температуру метанолу  $T_M$ ;
- температуру оксиду вуглецю  $T_{CO}$ ;
- тиск метанолу  $P_M$ ;
- тиск оксиду вуглецю  $P_{CO}$ ;
- витрату віддувальних газів  $F_{вг}$ ;
- температуру віддувальних газів  $T_{вг}$ ;
- витрату реакційної рідини на виході з сепаратора  $F_c$ ;
- витрату реакційної рідини на виході з реактора  $F_p$ ;
- витрату витрата потоку легкої фази конденсату після декантатора колони відгонки легких фракцій  $F_{лф}$ ;
- витрату витрата потоку важкої фази конденсату після декантатора колони відгонки легких фракцій  $F_{тф}$ ;
- температуру кубової рідини  $T_c$  на вході в реактор з сепаратора;
- температура потоку легкої фази конденсату після декантатора колони відгонки легких фракцій  $T_{лф}$ ;
- температура потоку важкої фази конденсату після декантатора колони відгонки легких фракцій  $T_{тф}$ ;

**Метою** даної роботи було побудова і дослідження властивостей лінійної нейронної мережі зі зворотним поширенням помилки з різною кількістю нейронів першого шару за основними каналами керування реактором синтезу оцтової кислоти. Побудовану мережу можливо було б використовувати для керування реактором.

**Виклад основного матеріалу.** В роботі досліджувалася двошарова лінійна нейронна мережа з прямою передачею сигналу за допомогою MATLAB 2021. Для цього використовувалися статистичні дані реактора синтезу оцтової кислоти. Для побудови нейронної мережі використовувалася ітераційна процедура.

Були досліджені основні канали керування реактором синтезу оцтової кислоти:

1. Витрата метанолу  $F_M$  - концентрація оцтової кислоти в реакційній рідині  $Q$ ;
2. Витрата метанолу  $F_M$  - температуру реакції синтезу  $T$ ;
3. Витрата метанолу  $F_M$  - рівень в реакторі реакційної суміші  $L$ ;
4. Витрата метанолу  $F_M$  - тиск в реакторі  $P$ ;
5. Витрата оксиду вуглецю  $F_{CO}$  - концентрація оцтової кислоти в реакційній рідині  $Q$ ;
6. Витрата оксиду вуглецю  $F_{CO}$  - температуру реакції синтезу  $T$ ;
7. Витрата оксиду вуглецю  $F_{CO}$  - рівень в реакторі реакційної суміші  $L$ ;

## 8. Витрата оксиду вуглецю $F_{CO}$ - тиск в реакторі P.

Для відображення послідовності входів використовувалася множина P, а відображення послідовності цілей використовувалася множина T.

Лінійні мережі здатні вирішувати лінійно відокремлені задачі класифікації та завдання апроксимації. Вони використовують правило навчання, засноване на методі найменших квадратів. Налаштування параметрів виконується таким чином, щоб забезпечити мінімум помилки. Поверхня помилки як функція входів має єдиний мінімум, і визначення цього мінімуму не викликає труднощів. Налаштування лінійної мережі може бути виконано за допомогою як процедури адаптації, так і процедури навчання. Для вирішення задачі апроксимації в роботі використовується правило навчання WH (Widrow-Hoff).

Архітектура нейронної мережі: перший шар містить спочатку 9 нейронів, потім 23 нейрона, а згодом 46 нейронів з функцією активації *tansig*. Другий шар містить один нейрон з функцією активації *purelin*. Діапазон зміни входу [8900-9800]. Архітектура нейронної мережі представлена з 9 нейронами в першому шарі показана на рисунку 2, з 23 нейронами в першому шарі – на рисунку 3, а з 46 нейронами в першому шарі – на рисунку 4.

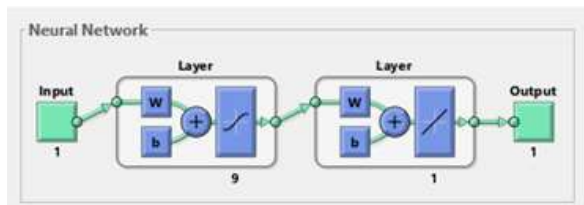


Рис. 2. Архітектура досліджуваної нейронної мережі з 9 нейронами в першому шарі

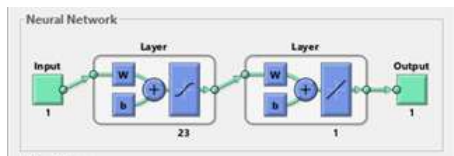


Рис. 3. Архітектура досліджуваної нейронної мережі з 23 нейронами в першому шарі

Програмний код для побудови нейронної мережі:

```
net=newff([8900 9800], [46 1], {'tansig', 'purelin'})
gensim(net)
```

Виконаємо моделювання мережі та розрахуємо відносну похибку для виходу мережі.

Навчимо мережу протягом 50 циклів. Програмний код в цьому випадку:

```
net.trainParam.epochs=50;
net=train(net, P, T);
```

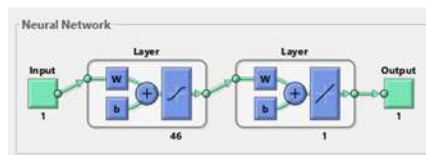


Рис. 4. Архітектура досліджуваної нейронної мережі з 46 нейронами в першому шарі

Виконаємо моделювання сформованої двошарової мережі, використовуючи перевірочну послідовність входу.

```
Y=sim(net, P1);
plot(P1,T, P, Y, 'o')
```

Результати моделювання нейронної мережі по кожному каналу керування реактором синтезу оцтової кислоти представлені в таблиці. Для кожного каналу була вирахована відносна похибка моделювання.

Якщо порівнювати відносні похибки мереж з прямою передачею сигналу каналу витрата метанолу, що подається в реактор синтезу оцтової кислоти і концентрація оцтової кислоти на виході реактора, можна бачити, що найменшу відносну похибку забезпечує мережа з 23 нейронами в першому шарі мережі. Вона становить 0,34% середнього значення концентрації оцтової кислоти на виході реактора. Потім йде мережа з 9 нейронами першого шару. Відносна похибка мережі становить 0,56%. Найбільшу похибку апроксимації забезпечує мережа з 46 нейронами першого шару. Вона забезпечує відносну похибку 0,7%. Відносна похибка мережі для каналу витрати метанолу, що подається в реактор синтезу оцтової кислоти і температура реакційної суміші в реакторі не змінюється зі збільшенням кількості нейронів першого шару з 23 до 46. У цьому випадку відносна похибка становить 0,16%. Незначно змінюється відносна похибка апроксимації каналу витрати метанолу, що подається в реактор синтезу оцтової кислоти і рівень реакційної суміші в реакторі. При збільшенні числа нейронів у першому шарі з 23 до 46 відносна похибка трохи змінюється з 0,59% до 0,58% відповідно. Для каналу витрати метанолу, що подається в реактор синтезу оцтової кислоти і тиск у реакторі зі збільшенням кількості нейронів у першому шарі з 23 до 46 відносна похибка зменшується з  $1.9 \cdot 10^{-8}\%$  до  $3.7 \cdot 10^{-7}\%$ .

Таблиця

Відносна похибка моделювання нейронної мережі по кожному каналу керування реактором синтезу оцтової кислоти

Канал	Кількість нейронів першого шару	Відносна похибка	Кількість нейронів першого шару	Відносна похибка	Кількість нейронів першого шару	Відносна похибка
F <sub>M</sub> -Q	9	0.0056	23	0.0034	46	0.0070
F <sub>M</sub> -T			23	0.0016	46	0.0016
F <sub>M</sub> -L			23	0.0059	46	0.0058
F <sub>M</sub> -P			23	$1.9 \cdot 10^{-10}$	46	$3.7 \cdot 10^{-09}$
F <sub>CO</sub> -Q	9	0.0051	23	0.0033	46	0.0070
F <sub>CO</sub> -T			23	0.0019	46	0.0021
F <sub>CO</sub> -L			23	0.0054	46	0.0078
F <sub>CO</sub> -P			23	$2.2 \cdot 10^{-10}$	46	$4.4 \cdot 10^{-08}$

Якщо порівнювати відносні похибки мереж з прямою передачею сигналу каналу витрата оксиду вуглецю, що подається в реактор синтезу оцтової кислоти і концентрація оцтової кислоти на виході реактора, можна бачити, що найменшу відносну похибку забезпечує мережу з 23 нейронами в першому шарі мережі. Вона становить 0,33% середнього значення концентрації оцтової кислоти на виході реактора. Потім йде мережа з 9 нейронами першого шару. Відносна похибка мережі становить 0,51%. Найбільшу похибку апроксимації забезпечує мережа з 46 нейронами першого шару. Вона забезпечує відносну похибку 0,7%. Відносна похибка мережі для каналу витрата оксиду вуглецю, що подається в реактор синтезу оцтової кислоти і температура реакційної суміші в реакторі змінюється незначно зі збільшенням кількості нейронів першого шару з 23 до 46. У цьому випадку відносна похибка становить 0,19% і 0,21%. Також змінюється відносна похибка апроксимації каналу витрата оксиду вуглецю, що подається в реактор синтезу оцтової кислоти і рівень реакційної суміші в реакторі. При збільшенні числа нейронів у першому шарі з 23 до 46 відносна похибка змінюється з 0,54 до 0,78% відповідно. Для каналу витрата метанолу, що подається в реактор синтезу оцтової кислоти і тиск у реакторі зі збільшенням кількості нейронів у першому шарі з 23 до 46 відносна похибка зменшується з  $1.9 \cdot 10^{-8}\%$  до  $3.7 \cdot 10^{-7}\%$ .

**Висновки:** Для створення керуючої системи з використанням нейронних мереж при стаціонарному режимі роботи реактора синтезу оцтової кислоти необхідно визначити структуру нейромережі, провести навчання на підставі технологічних показників і провести апробацію роботи мережі з використанням обладнання цеху оцтової кислоти. У тому випадку, якщо

залежності мають лінійний характер для апроксимації даних можна використовувати лінійні нейронні мережі з зворотнім поширенням помилки. Моделювання нейромережі з використанням MATLAB 2021 показало успішність процесу побудови та навчання нейронної мережі та його задовільну якість, яка дозволить використовувати нейромережі для управління технологічними процесами синтезу оцтової кислоти та перспективність подальших досліджень цього напрямку.

#### Л і т е р а т у р а

1. Бойко С. Застосування нейронних мереж при автоматизації діагностики стану авіаційного генератора гвинтокрила.// С. Бойко, Є. Волканін, О. Городній, О. Борисенко, Л. Вершняк.- ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ.- 2018.-№ 3 (13), С.152-160
2. Маковецька, С. В. Застосування штучних нейронних мереж для прогнозування динаміки технологічного процесу в умовах невизначеності / С. В. Маковецька, О. М. Мягшило // Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами: програма та матеріали II Міжнародної науково-технічної Internet-конференції, 25 листопада 2015 р. [Електронний ресурс] – К.: НУХТ, 2015. – С. 188-189. - Режим доступу: <https://nuft.edu.ua/page/view/konferentsii>.
3. Гончаренко Т. А. Застосування технології штучних нейронних мереж для моделювання рельєфу будівельного майданчика/Т. А. Гончаренко// Управління розвитком складних систем: зб. наук. робіт / Київ. нац. ун-т буд-ва та архітектури; гол. ред. Лізунов П. П. – Київ: КНУБА, 2017. – № 29. – С. 116 – 120.
4. Paredes-Astudillo Y.A. Comparing linear and non-linear modelling approaches of learning effects in 2-stage flow-shop scheduling problems/ Y. A. Paredes-

- Astudillo, V. Botta-Genoulaz, J. R. Montoya-Torres // *IFAC Papers OnLine* .- 55-10 (2022), P. 842–847
5. Steentjes Tom R.V. Handling unmeasured disturbances in data-driven distributed control with virtual reference feedback tuning/ Tom R.V. Steentjes, Paul M.J. Van den Hof, Mircea Lazar // *IFAC Papers OnLine*.- 54-7 (2021), P. 204–209
  6. Borg D. Neural networks as a diagnosing tool for industrial level measurement through non contacting radar type and support to the decision for its better application / D. Borg, F. F. Pinto, M. Suetake, D. Brandão// *IFAC-PapersOnLine*.- 49-30 (2016).-p. 349–354
  7. Topolski N.G. Computer Aided Fire safety Systems in Chemical Industries. / N.G.Topolski, V.S.Vatagin, // Mary Kay O'Connor Process Safety Center Symposium. -Proceeding.- October 24-25.- 2000.- Reed Arena.- Texas A&M. -University, College Station, Texas- p.348-349.
  8. Baskin I.I. Quantitative chemical structure – property/activity relationship studies using artificial neural networks. / I.I. Baskin, M.I.Skvortsova, V.A.Palyulin, N.S.Zefirov // *Foundations of Computing and Decision Sciences*. - 1997. - Vol. 22, № 2. – P. 107-116.
  9. Porkujan Olga «Neural network simulation in running of acetic acid syntesis unit while start-up»/ Olga Porkujan, Zhanna Samojlova.- TEKA, Польща, Academy of Sciences (PAN), with registered offices in Warsaw, 2013, p.188-192
  10. Tronci S. A Gain-Scheduling PI Control Based on Neural Networks/ Stefania Tronci , Roberto Baratti// *Hindawi Complexity Volume 2017, Article ID 9241254, 8 pages*
  11. Joschka W. Overcoming the modeling bottleneck: A methodology for dynamic gray-box modeling with optimized training data / Winz J. , Fromme F., Engell S. Process Dynamics and Operations Group, TU Dortmund University, Energy reports, -Issue 10. - November 2023, pages 396-406
  12. Moon Un-Chul. A comparative study of water wall model with a linear model and a neural network model/ Un-Chul Moon, Jaewoo Lim, Geon Go, Kwang. Y. Lee// *Proceedings of the 19th World Congress The International Federation of Automatic Control Cape Town, South Africa. August 24-29, 2014, p.1446-1451*
  13. Самойлова Ж.Г. Розробка математичної моделі технологічних процесів в реакторі синтезу оцтової кислоти/ Ж.Г.Самойлова// *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5/2 ( 113 ), 2021, C.94-104*
- References**
1. Boyko S. Establishment of neural networks in the automation of diagnostics of an aircraft generator of quintocryl.// S. Boyko, E. Volkanin, O. Gorodniy, O. Borisenko, L. Vershnyak. - *TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES*. - 2018. - No. 3 (13), pp. 152-160
  2. Makovetska, S. V. Establishment of piece-by-piece neural measures for predicting the dynamics of a technological process in the minds of insignificance / S. V. Makovetska, O. M. Myagshilo // *Modern methods, information, software and technical support for control systems scientific and technical and technological complexes: program and materials of the 2nd International Scientific and Technical Internet Conference, November 25, 2015. [Electronic resource] – K.: NUHT, 2015. – 241 p. - pp. 188-189. - Access mode: <https://nuft.edu.ua/page/view/konferentsii>.*
  3. Goncharenko T. A. Establishment of the technology of piece neural mesh for modeling the relief of the maidan / T. A. Goncharenko // *Management of the development of folding systems: zb. Sci. robot / Kiev. national University of Bud-va and Architecture; Goal. ed. Lizunov P. P. – Kiev: KNUBA, 2017. – No. 29. – P. 116 – 120.*
  4. Paredes-Astudillo Y.A. Comparing linear and non-linear modeling approaches of learning effects in 2-stage flow-shop scheduling problems/ Y. A. Paredes-Astudillo, V. Botta-Genoulaz, J. R. Montoya-Torres // *IFAC Papers OnLine* .- 55-10 (2022), p. 842–847
  5. Steentjes Tom R.V. Handling unmeasured disturbances in data-driven distributed control with virtual reference feedback tuning/ Tom R.V. Steentjes, Paul M.J. Van den Hof, Mircea Lazar // *IFAC Papers OnLine*.- 54-7 (2021), p. 204–209
  6. Borg D. Neural networks as a diagnosing tool for industrial level measurement through non contacting radar type and support to the decision for its better application / D. Borg, F. F. Pinto, M. Suetake, D. Brandão // *IFAC-PapersOnLine*. - 49-30 (2016).-p. 349–354
  7. Topolski N.G. Computer Aided Fire safety Systems in Chemical Industries. / N.G.Topolski, V.S.Vatagin, // Mary Kay O'Connor Process Safety Center Symposium. -Proceeding.- October 24-25.- 2000.- Reed Arena.- Texas A&M. -University, College Station, Texas- p.348-349.
  8. Baskin I.I. Quantitative chemical structure – property/activity relationship studies using artificial neural networks. / I.I. Baskin, M.I.Skvortsova, V.A.Palyulin, N.S.Zefirov // *Foundations of Computing and Decision Sciences*. - 1997. - Vol. 22, No. 2. – P. 107-116.
  9. Porkujan Olga “Neural network simulation in running of acetic acid syntesis unit while start-up”/ Olga Porkujan, Zhanna Samojlova.- TEKA, Poland, Academy of Sciences (PAN), with registered offices in Warsaw, 2013, p.188 -192
  10. Tronci S. A Gain-Scheduling PI Control Based on Neural Networks/ Stefania Tronci , Roberto Baratti // *Hindawi Complexity Volume 2017, Article ID 9241254, 8 pages*
  11. Joschka W. Overcoming the modeling bottleneck: A methodology for dynamic gray-box modeling with optimized training data / Winz J. , Fromme F., Engell S. Process Dynamics and Operations Group, TU

Dortmund University, Energy reports, -Issue 10 - November 2023, pages 396-406

12. Moon Un-Chul. A comparative study of water wall model with a linear model and a neural network model/ Un-Chul Moon, Jaewoo Lim, Geon Go, Kwang. Y. Lee // Proceedings of the 19th World Congress The International Federation of Automatic Control Cape Town, South Africa. August 24-29, 2014, p.1446-1451
13. Samoiloza Zh.G. Development of a mathematical model of technological processes in a reactor for the synthesis of acetic acid / Zh.G. Samoiloza // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5/2 ( 113 ), 2021, pp. 94-104

**Porkuyan O.V., Samoiloza Zh.G. Linear Neural Network Modeling with Error Backpropagation for Basic Control Channels of Acetic Acid Synthesis Reactor**

*Nowadays, to control technological objects, one can use neural networks, fuzzy logic and genetic algorithms. There have been few attempts to use artificial intelligence technologies to build automatic control systems.*

*However, only in recent years, with the growth of research in the field of nonlinear control, the use of artificial intelligence technologies in the management of technological processes has become widespread.*

*Simulation and research of the work of artificial neural networks can be carried out with the help of software simulators. The most common packages for modeling the properties of neural networks are Neural Works Pro Plus, Neuro Solution, Matlab (Neural Network Toolbox), Neuro Wisard, ANsim, Neural Ware and others. Programs differ in complexity, number of types of neurons and learning algorithms supported in the system.*

*The article investigates the construction of linear neural networks with backpropagation of the error for the main control channels of the acetic acid synthesis reactor.*

*To construct and study the properties of the neural network, statistical data of the acetic acid synthesis reactor in the stationary mode of the Severodonetsk acetic acid workshop of CJSC "Azot" were used.*

*The MATLAB 2021 software simulator environment was used for simulation. This program is recommended for modeling different neural networks with different number of neurons and different type of activation function. An iterative procedure was used to build the neural network.*

*Neural network architecture: the first layer contains first 9 neurons, then 23 neurons, and later 46 neurons with tansig activation function. The second layer contains one neuron with purelin activation function. Input change range [8900-9800].*

*Neural network training was performed for 50 cycles. Then network modeling was performed. At the end of the simulation, the relative error for the network output was calculated.*

*In the event that the dependencies are linear in nature, linear neural networks with backpropagation of the error can be used to approximate the data. All created and modeled neural networks for all main control channels showed satisfactory data approximation quality. The quality of data approximation was less than 1% in all cases. This will allow the use of neural networks to control technological processes of acetic acid synthesis and the prospects for further research in this area.*

**Keywords:** neural networks, error back propagation, reactor

**Поркуян Ольга Вікторівна** — доктор технічних наук, професор, ректор Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля ( м.Київ) porkuyan@snu.edu.ua

**Самойлова Жанна Георгіївна** — кандидат технічних наук, доцент кафедри електронних апаратів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля ( м.Київ) [samoilova@snu.edu.ua](mailto:samoilova@snu.edu.ua)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2023-279-3-37-44>

УДК 662.758

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРЯМОГО ОКИСНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО АЗОТУ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІЇ УСТАНОВКИ ОТРИМАННЯ НІТРАТНОЇ КИСЛОТИ

Слободянюк В.П., Кузьменко А.В., Целіщев О. Б.,  
Кудрявцев С.О., Лорія М.Г., Дурищев О.А.

## SIMULATION OF THE PROCESS OF DIRECT OXIDATION OF ATMOSPHERIC NITROGEN AND STUDY OF THE OPTIMAL DESIGN OF THE NITRIC ACID PRODUCTION INSTALLATION

Slobodyanyuk V.P., Kuzmenko A.V., Tselishchev O.B.,  
Kudryavtsev S.O., Loria M.G., Duryshch O.A.

*В роботі досліджено процес окиснення молекулярного азоту високоенергетичними окисниками (парою нітратної кислоти, продуктами термолізу нітратної кислоти, гідроген пероксидом).*

*Розроблено принципову схему установки прямого окиснення молекулярного азоту, розроблено методику проведення експерименту та аналізу нітрогеновмісних сполук та інших учасників реакції. Методи дослідження - моделювання процесу прямого окиснення молекулярного азоту з використанням результатів попередніх досліджень та результатів теоретичних квантово-хімічних досліджень, обробка та аналіз отриманих результатів.*

*Було проведено детальний аналіз експериментальних та теоретичних даних, що стосуються можливості здійснення процесу прямого окиснення молекулярного азоту парою нітратної кислоти та гідроген пероксидом. Для досягнення цієї мети була розроблена принципова схема лабораторної установки з внесенням модифікацій для дослідження ефектів Караваєва, Нагієва та Захарова. Також були запропоновані методики аналізу оксидів нітрогену у газовій фазі та для дослідження кількісного вмісту нітратної кислоти у розчині та якісного визначення присутності закису нітрогену, як можливого продукту реакції. Для реалізації процесу отримання нітратної кислоти з атмосферного повітря методом Захарова І.І. з використанням ефектів Караваєва та Нагієва найбільш перспективною виявилась конструкція реакторного вузла, що складається з трубки-реактора, суміщеної із котушкою Тесли та з підведенням регульованого потоку повітря в зону розряду, виведенням*

*реакційних газів з трубки-реактору в доокиснювач-охолоджувач та подальша абсорбція з окисненням до нітратної кислоти оксидів нітрогену в абсорбері, заповненому водою з додаванням перекису водню.*

*Ефективно впливає на збільшення концентрації оксидів нітрогену в реакційних газах зменшення витрати повітря та поліпшення контакту (через зменшення діаметру вхідного отвору або самого реактору) повітря із розрядом котушки Тесла, або з подум'ям плазмогенератору. Додавання перекису водню покращує окиснення та абсорбцію оксидів нітрогену з утворенням кислоти в абсорбері.*

**Ключові слова:** нітратна кислота, оксиди нітрогену, гідроген пероксид, окиснення, енергія активації, збуджений стан, квантово-хімічні розрахунки.

**Вступ.** Роль нітрогену в природі та людському житті є надзвичайно важливою. Цей елемент входить до складу всіх живих організмів і відіграє суттєву роль у багатьох біохімічних процесах. Особливо важливим є його присутність у білках, які є ключовими поживними речовинами для тварин і людини. Нітроген має значний вплив на життєдіяльність рослинного і тваринного світу.

Крім того, сполуки нітрогену широко використовуються в промисловості для виробництва проміжних продуктів, барвників, пластичних мас, хімічних волокон, медикаментів та інших

матеріалів. Вони також мають велике значення у виробництві вибухових речовин і запалювальних засобів.

Проте азот являє собою стійку речовину, і у синтезі білків в рослинних і тваринних організмах використовується не молекулярний азот, а його хімічні сполуки. Для промислового використання доступні поклади сполук, що містять нітроген (наприклад, натрієва селітра), знайдені на узбережжі Чилі та в Південній Африці. Також невеликі кількості зв'язаного азоту можна отримати при коксуванні вугілля. Проте природні поклади таких сполук не можуть задовольнити постійно зростаючу потребу в нітратних добривах та інших сполуках, які містять нітроген, зокрема в нітратній кислоті. Остання є ключовим компонентом багатьох сучасних виробництв, включаючи виробництво нітратних добрив.

Нітратна кислота ( $HNO_3$ ) володіє високою реакційною активністю і може бути використана для окиснення атмосферного азоту. Під час цих реакцій утворюються оксиди нітрогену ( $NO_x$ ), які мають вплив на здоров'я людини та довкілля.

Для дослідження реакційної здатності нітратної кислоти та продуктів її розпаду в процесі окиснення атмосферного азоту застосовуються різні методики та аналітичні інструменти.

Один з методів включає визначення концентрації  $NO_x$  в атмосфері шляхом використання аналітичних інструментів, таких як газова хроматографія та мас-спектроскопія. Ці методи дозволяють визначити кількість  $NO_x$  та інших забруднювачів у повітрі.

Додатково, експериментальні дослідження можуть бути проведені для вивчення характеристик реакцій між азотною кислотою та атмосферним азотом. Для цього можна використовувати спеціально розроблені реакційні установки та проводити експерименти при різних умовах, таких як температура, тиск, концентрація реагентів та інші параметри

Також, можна вивчити процеси окиснення атмосферного азоту за допомогою моделювання комп'ютерних систем. За допомогою комп'ютерного моделювання можна дослідити вплив різних факторів на реакційну здатність нітратної кислоти та її продуктів розпаду.

Процес окиснення молекулярного азоту ( $N_2$ ) високоенергетичними окисниками, такими як пара нітратної кислоти ( $HNO_3$ ), продукти термолізу нітратної кислоти і гідроген пероксид ( $H_2O_2$ ), може призводити до утворення різних нітратвмісних сполук, таких як оксиди азоту ( $NO_x$ ) і нітрати ( $NO_3^-$ ). Цей процес є важливим в

хімії атмосферних реакцій і може мати вплив на якість повітря та навколишнє середовище.

Окиснення молекулярного азоту може протікати різними реакційними шляхами залежно від умов і використовуваних окисників:

Окиснення молекулярного азоту парою нітратної кислоти ( $HNO_3$ ): Ця реакція відбувається при високих температурах і може бути використана, наприклад, в ракетних двигунах. Реакційне рівняння:  $N_2 + 2HNO_3 \rightarrow 2NO_2 + H_2O$

Термоліз нітратної кислоти ( $HNO_3$ ): При нагріванні нітратної кислоти відбувається її розклад, утворюючи оксиди нітрогену та кисневий газ. Реакційне рівняння:  $4HNO_3 \rightarrow 2H_2O + 4NO_2 + O_2$

Окиснення молекулярного азоту гідроген пероксидом ( $H_2O_2$ ): Ця реакція може відбутися за наявності каталізаторів і відбувається дещо іншим шляхом:  $N_2 + H_2O_2 \rightarrow 2HNO_3$

Утворені нітратвмісні сполуки, такі як оксиди нітрогену і нітрати, можуть мати значний вплив на хімічний склад атмосфери. Наприклад, оксиди нітрогену ( $NO_x$ ), особливо діоксид нітрогену ( $NO_2$ ), можуть сприяти формуванню смогу та кислотного дощу, а також впливати на якість повітря і здоров'я людей. Нітрати можуть бути важливими джерелами нітратвмісних іонів для рослин у процесі нітрифікації.

Ці процеси є складними і залежать від багатьох факторів, таких як температура, тиск, концентрації реагентів і наявність каталізаторів.

Усі ці методи дозволяють дослідити реакційну здатність нітратної кислоти та продуктів її розпаду в реакціях окиснення атмосферного азоту.

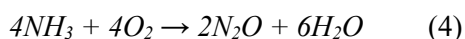
**Викладення основного матеріалу.** Традиційний промисловий процес виробництва нітратної кислоти включає каталітичне згоряння аміаку на каталізаторі з платино-родієвого сплаву (95% Pt і 5% Rh), що представляє собою в'язані решітки. Це відбувається за температур 800-950°C і тиску 0.4 – 1 МПа у каталітичній камері. Під час цього процесу утворюється оксид нітрогену ( $NO$ ). Подальше окиснення оксиду нітрогену відбувається за низької температури 50°C і підвищеного тиску у камері окиснення, утворюючи діоксид нітрогену ( $NO_2$ ), який потім з'єднується з водою в абсорбційній колоні для отримання нітратної кислоти [1,2]:





Дослідження прямої реакції окиснення аміаку до оксиду нітрогену показали, що продукти реакції (1) утворюються через надзвичайно швидко, високоекзотермічну і нерівноважну реакцію, яка відбувається згідно з певним складним механізмом. Ефективність утворення NO значно залежить від високої температури (приблизно 850-950°C) та підвищеного тиску. Однак цей високотемпературний каталітичний процес окиснення аміаку може призвести до механічного пошкодження каталітичних решіток, утворення оксидів платини на поверхні каталізатора (через недостатнє змішування аміаку та повітря) та нерівномірного розподілу газу по каталізатору.

Крім того, під час цього процесу також утворюється  $N_2O$  як неселективний продукт реакції, згідно з рівнянням[3,4]:



Традиційний метод є ефективним, але загальна продуктивність обмежена кількома недоліками, такими як:

- приблизно 30% загальної вартості виробництва нітратної кислоти припадає на аміак як сировину, що обмежує економічний результат з цього джерела сировини і включає екологічні проблеми;
- втрати металів платинової групи через випаровування та ерозію.
- складний процес утворення конденсату під час утворення  $HNO_3$ .
- високі капіталовкладення та операційні витрати на численні блоки операцій.

Виробництво нітратної кислоти має важливе значення для отримання нітратвмісних сполук, таких як сечовина, аміачна, натрієва та калієва нітрата тощо. Більшість сучасних виробництв, включаючи українські, отримують нітратну кислоту шляхом окиснення аміаку та подальшої абсорбції оксидів нітрогену. Цей процес характеризується використанням великої кількості метану та енергії для синтезу аміаку, а також екологічними проблемами, пов'язаними з очищенням хвостових газів.

Відповідно до сучасних експериментальних даних [5], дослідження нітратвмісних сполук з високим вмістом енергії проводяться в рамках аналізу продуктів інтенсивного термолізу нітратної кислоти. Дослідники [6] стверджують, що ін'єкція нітратної кислоти в атмосферу при температурі 758-1173 До призводить до збільшення оксидів нітрогену на 85%. Це дає

підстави припускати, що в продуктах термолізу нітратної кислоти можуть утворюватися молекули з високою енергетичною структурою, здатні активувати та окислювати молекулярний азот. Результати дослідження вказують на те, що такими високоенергетичними сполуками в продуктах швидкого термолізу нітратної кислоти можуть бути оксо-ізомери.

Отже, отримані висновки є логічним поясненням експериментів, проведених М.М. Караваєвим [7,8], у межах автокаталітичного використання парів нітратної кислоти для активації молекулярного азоту. Ці результати можуть стати відправною точкою для розробки нових методів зв'язування атмосферного азоту та активації метану, які є фундаментальними проблемами в галузі хімічної науки і технології [9, 10].

З урахуванням зазначеного, можна зробити висновок, що розробка технології, яка дозволить отримувати нітратну кислоту з повітря, обходячи етап отримання аміаку, і при цьому буде екологічно чистою, є надзвичайно важливою і актуальною задачею.

Мета роботи – розробка принципової технологічної схеми установки з отримання нітратної кислоти шляхом моделювання процесу прямого окиснення та дослідження реакційної здатності азотної кислоти та продуктів її розпаду в реакціях окиснення атмосферного азоту.

Для досягнення мети необхідно виконати задачі

1. Дослідження можливості окиснення молекулярного азоту парою нітратної кислоти та окислами азоту (ефект Караваєва). Експериментальне дослідження окисних властивостей  $H_2O_2$  в реакції зв'язування азоту в  $N_2O$  (ефект Нагієва)».

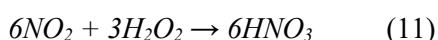
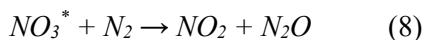
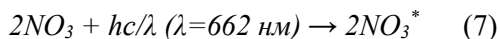
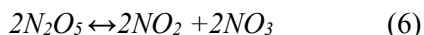
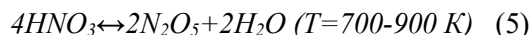
2. Дослідження ефективної конструкції реакційного вузла для здійснення процесу окиснення атмосферного повітря в нітратну кислоту.

3. Пошук оптимального способу створення активованих оксидів нітрогену в реакційній зоні. Вибір способу дозування повітря в реакційну зону.

4. Дослідження способу підвищення концентрації оксидів нітрогену в реакційних газах та концентрації кислоти після стадії абсорбції газу.

Аналіз результатів квантово-хімічних розрахунків Захарова І.І. [5] та експериментальних досліджень Караваєва і Нагієва [6] (дозволяють запропонувати схему з використанням сумісного процесу окиснення молекулярного азоту продуктами термічного розкладання нітратної кислоти (ефект Караваєва, реакції 5-11) і

продуктами термічного розкладання гідроген пероксиду (ефект Нагієва, реакції 12-16).



де 5 – термічна деструкція  $HNO_3$ ;

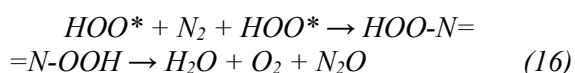
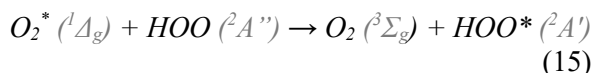
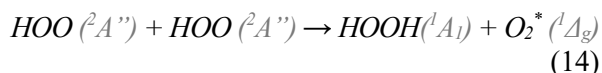
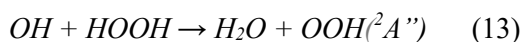
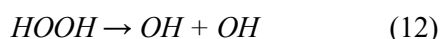
6 – дисоціація  $N_2O_5$  з утворенням триоксиду  $NO_3$ ;

7 – фотохімічна активація триоксиду у збудженому стані  $NO_3^*$ ;

8 та 9 – активація молекулярного азоту та закису нітрогену, як продукту деструкції  $NO_3^*$ ;

10, 11 – хімічні реакції репродукції нітратної кислоти

Квантово-хімічне дослідження можливості активації  $N_2$  гідроген пероксидними радикалами ООН (Захаров І.І.)



де 12 – термічне розкладання гідроген пероксиду з утворенням гідроксильних радикалів;

13 – взаємодія гідроксильних радикалів з гідроген пероксидом;

14 – димеризація радикалів  $HO_2$  для формування синглетного кисню  $O_2(^1\Delta_g)$ ;

15 – взаємодія  $O_2(^1\Delta_g)$  з гідроген пероксидним радикалом;

16 – взаємодія азоту  $N_2$  з гідроген пероксидними радикалами у збудженому стані з утворенням інтермедіату та його розкладанням.

Аналіз результатів квантово-хімічних розрахунків Захарова І.І. та експериментальних досліджень Караваєва і Нагієва дозволяють запропонувати схему з використанням сумісного процесу окиснення молекулярного азоту продуктами термічного розкладання нітратної кислоти (ефект Караваєва) і продуктами термічного розкладання гідроген пероксиду (ефект Нагієва).

Таким чином, в умовах реальної установки для отримання нітратної кислоти повинно реалізуватись декілька ключових принципів:

= Створення концентрації активованих частинок  $NO_3^*$  (забезпечує реалізацію реакцій (3-5);

= Створення концентрації активованих частинок  $OH$  (забезпечує реалізацію реакції (12);

= Можливість підведення до реакційної зони опромінення  $\lambda=662 \text{ нм}$ ;

= Наявність в реакційній зоні оксидів нітрогену  $N_2O_5, NO_2$

Данні принципи можна реалізувати різними технічними рішеннями. Найбільш доцільно перевіряти життєздатність таких технічних рішень – варіантів конструктивного оформлення установки.

Запропоновано виконати реактор у вигляді трубки з термостійкого матеріалу (кварцового скла або іншого матеріалу, наприклад, титану) та подавати в нього плазму температурою понад 3000К. Це дозволить створити в потоці повітря, що подається через кварцову трубку, низку активованих частинок, серед яких гарантовано будуть присутні оксиди нітрогену всіх видів та  $OH$  радикали. Таке технічне рішення дозволяє реалізувати ключові принципи за умови освітлення відповідним приладом.

Виконання реактора у вигляді кварцової трубки та створення розряду в ньому за допомогою котушки Тесла з одночасним пропусканням повітря через реактор із заданою швидкістю. Інтенсивний розряд від котушки дозволить генерувати з повітря всі можливі види оксидів. Пари води, що містяться в повітрі, теоретично здатні згенерувати  $OH$  радикали.

Для перевірки технічних рішень (окремо, або їх комбінацій) створювались різні варіанти конструкції установки, які перевірялись на можливість здійснення безперервного процесу такої період часу, щоб мати можливість отримати в якості продукту нітратну кислоту певної концентрації.



або компресором **НЗ**, і тоді тиск в установці становить вище за атмосферний.

Установка (рис. 2), складається з основних блоків: котушка Тесли – генератор активованих частинок, реакторна частина, блок фіксації оксидів нітрогену. Установка реалізується на базі установки, зображеної на рис 1, шляхом заміни плазмогенератору **ПГ** на генератор розрядів **ГР**, роль якого виконує котушка Тесли.

Генерація активованих частинок повинна відбуватись в зоні розряду від котушки Тесли в реакторі.

Аналіз досліджень показує процес утворення оксидів нітрогену в реакційних газах. Вміст оксидів нітрогену залежить від параметрів роботи плазмогенератору, від складу рідини, заправленої в паливник, від витрати повітря. Але найбільша досягнута концентрація оксидів нітрогену склала всього 99 ppm. Це не дозволило ефективно реалізувати процес їх абсорбції в склянці Дрекселя – нітратну кислоту в склянці визначити титруванням та нітрат-селективним електродом не вдалось.

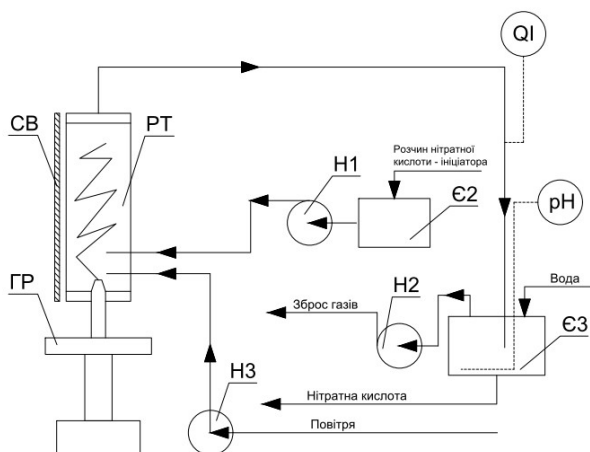


Рис. 2. Лабораторна установка для отримання нітратної кислоти через керовану активацію атмосферного азоту з генерацією активованих частинок котушкою Тесли

Інтенсивність та тривалість розряду котушки регулюються та є параметрами керування, зміну яких буде досліджено при виконанні експериментальних робіт. Ємність **Є1** та форсунка **Ф** виключаються з процесу. Розчин ініціатору здійснюється виключно через ємність **Є2** насосом **Н1**. Реактор **РТ** при цьому з горизонтального положення переміщається в вертикальне положення.

Конструкція реактору є стійкою, але вузьким місцем виявилась форсунка паливника

плазмогенератору. Вона перегрівалась через 20-50 хвилин роботи установки. Паливник потребував постійної дозаправки рідиною, що впливало на концентрацію оксидів нітрогену, і хоча процес відтворювався в різних паралельних експериментах – керування ним виявилось складним.

Вплив інтенсивності опромінення виявити не вдалось, бо в даній конструкції світло було побічним ефектом, що супроводжує процес генерування плазми.

#### Висновки.

1. Для реалізації процесу отримання нітратної кислоти з атмосферного повітря методом Захарова І.І. з використанням ефектів Караваєва та Нагієва найбільш перспективною з трьох досліджених варіантів виявилась конструкція реакторного вузла, що складається з трубки-реактора, суміщеної із котушкою Тесли та з підведенням регульованого потоку повітря в зону розряду, виведенням реакційних газів з трубки-реактору в доокиснювач-охолоджувач та подальша абсорбція з окисненням до нітратної кислоти оксидів нітрогену в абсорбері, заповненим водою з додаванням перекису водню.

2. При порівнянні двох способів створення активованих оксидів нітрогену в реакційній зоні: за допомогою плазмогенератору та від котушки Тесли більш ефективним виявилась саме котушка Тесли. Наявність розряду в понад 20 разів збільшує початкову концентрації оксидів нітрогену в порівнянні з використанням плазми за інших рівних умов.

3. Витрата повітря однаково зручно регулюється і при протягуванні повітря через реакційну зону вакуумним насосом і при подаванні повітря в реакційну зону компресором. Перевагою компресору є можливість попередньої підготовки повітря (видалення пилу, вологи). Перевагою вакуумного насосу є відсутність необхідності герметизувати всі вузли установки.

4. Ефективно впливає на збільшення концентрації оксидів нітрогену в реакційних газах зменшення витрати повітря та поліпшення контакту (через зменшення діаметру вхідного отвору або самого реактору) повітря із розрядом котушки Тесла, або з полум'ям плазмогенератору. Додавання перекису водню покращує окиснення та абсорбцію оксидів нітрогену з утворенням кислоти в абсорбері. Конструкція абсорберу (висота шару абсорбенту, діаметр, що впливає на масообмін поміж рідиною та газами, наявність насадки та краплевідбійника тощо) також змінює концентрацію кислоти в рідкій фазі.

## Література

1. Электронная и геометрическая структуры изомеров азотной кислоты. Квантово-химические DFT расчеты / И. И. Захаров, О. И. Захарова, А. Б. Целищев, М. Г. Лория // Журнал структурной химии. – 2009. – Т. 50, №5. – С. 843–851.
2. Photochemical Water Decomposition in the Presence of Nitrogen Dioxide in Troposphere: Density Functional Study with a Symmetrized Kohn-Sham Formalism/ В. F. Minaev, I. I. Zakharov, A. B. Tselishev [and other] // ChemPhysChem. – 2010. – Vol. 11. – Issue 18, DOI: 10.1002/cphc.201000440. – P. 4028–4034.
3. Захаров И. И. Структура интермедиата НОО-N=N-ООН при активации N<sub>2</sub> перекисью водорода. Квантово-химические DFT расчеты / И. И. Захаров, М. Г. Лория, А. Б. Целищев // Журнал структурной химии. – 2013. – Т. 54, №1. – С. 17–24.
4. Караваев М.М. Гетерогенно-каталитическое окисление азота парами азотно Караваев, В. А. Матышак // Химическая промышленность. – 1998. – No 9. – С. 537-542.
5. Захаров И.И. Исследование структуры высокоэнергетических состояний триоксида азота и димера (NO)<sub>2</sub>: DFT расчеты в рамках симметризованного формализма Кона-Шэма / И.И. Захаров // Журнал структурной химии. – 2011. – 52, No 3. – С. 461-469.
6. Захаров И. И. Квантово-химическое исследование возможности фото-химической активации молекулярного азота / И. И. Захаров // Теоретическая и экспериментальная химия. – 2012. – Т. 48, No 3. – С. 91-195.
7. Связывание азота в виде его закиси / М. Ф.Нагиев, Т. М. Нагиев, Ф. А. Асланов, В. М. Байрамов, Р.А. Искендеров // ДАН СССР. – 1973. – Т. 213, No 5. – С. 1096-1098.
8. Нагиев Т.М. Сопряженные реакции окисления перекисью водовода / Т.М. Нагиев // Успехи химии. – 1985. – 54, No 10. – С. 1654-1673.
9. Захаров И. И. Структура интермедиата НОО—N=N—ООН при активации N<sub>2</sub> перекисью водорода. Квантово-химические DFT расчеты / И. И. Захаров, М. Г. Лория, А. Б. Целищев // Журнал структурной химии. – 2013. – 54, No 1. – С. 17-24.

## References

1. Elektronnaia y heometrycheskaia struktury yzomerov azotnoi kysloty. Kvantovo-khymycheskye DFT raschetы / Y. Y. Zakharov, O. Y. Zakharova, A. B. Tselyshchev, M. H. Loryia // Zhurnal struktornoй khymyy. – 2009. – T. 50, №5. – S. 843–851.
2. Photochemical Water Decomposition in the Presence of Nitrogen Dioxide in Troposphere: Density Functional Study with a Symmetrized Kohn-Sham Formalism/ B. F. Minaev, I. I. Zakharov, A. B. Tselishev [and other] // ChemPhysChem. – 2010. – Vol. 11. – Issue 18, DOI: 10.1002/cphc.201000440. – R. 4028–4034.

3. Zakharov Y. Y. Struktura yntermedyata NOO-N=N-OON pry aktyvatsyy N<sub>2</sub> perekysiu vodoroda. Kvantovo-khymycheskye DFT raschetы / Y. Y. Zakharov, M. H. Loryia, A. B. Tselyshchev // Zhurnal struktornoй khymyy. – 2013. – T. 54, №1. – S. 17–24.
4. Karavaev M.M. Heterohenno-katalytycheskoe okyslenye azota paramy azotno Karavaev, V. A. Mатышак // Khymycheskaia promyshlennost. – 1998. – No 9. – S. 537-542.
5. Zakharov Y.Y. Yssledovanye struktury vysokoenerhetycheskykh sostoianiy tryoksyda azota y dymera (NO)<sub>2</sub>: DFT raschetы v ramkakh symmetryzovannoho formalyzma Kona-Shэma / Y.Y. Zakharov // Zhurnal struktornoй khymyy. – 2011. – 52, No 3. – S. 461-469.
6. Zakharov Y. Y. Kvantovo-khymycheskoe yssledovanye vozmozhnosity foto-khymycheskoi aktyvatsyy molekuliarnoho azota / Y. Y. Zakharov // Teoretycheskaia y eksperymentalnaia khymyia. – 2012. – T. 48, No 3. – S. 91-195.
7. Sviazyvanye azota v vyde eho zakysy / M. F.Nahyev, T. M. Nahyev, F. A. Aslanov, V. M. Bairamov, R.A. Yskenderov // DAN SSSR. – 1973. – T. 213, No 5. – S. 1096-1098.
8. Nahyev T.M. Sopriazhennyye reaksyy okysleniya perekysiu vodovoda / T.M. Nahyev // Uspekhy khymyy. – 1985. – 54, No 10. – S. 1654-1673.
9. Zakharov Y. Y. Struktura yntermedyata НОО—N=N—ООН pry aktyvatsyy N<sub>2</sub> perekysiu vodoroda. Kvantovo-khymycheskye DFT raschetы / Y. Y. Zakharov, M. H. Loryia, A. B. Tselyshchev // Zhurnal struktornoй khymyy. – 2013. – 54, No 1. – S. 17-24.

**Slobodyanyuk V.P., Kuzmenko A.V., Kudryavtsev S. O., Loria M. G., Tselishchev O. B. Simulation of the process of direct oxidation of atmospheric nitrogen and study of the optimal design of the nitric acid production installation.**

*The work examines the process of oxidation of molecular nitrogen by high-energy oxidants (nitric acid steam, products of thermolysis of nitric acid, hydrogen peroxide).*

*The principle scheme of the installation of direct oxidation of molecular nitrogen has been developed, the methodology of the experiment and analysis of nitrogen-containing compounds and other participants of the reaction has been developed. Research methods - modeling of the process of direct oxidation of molecular nitrogen using the results of previous studies and the results of theoretical quantum chemical studies, processing and analysis of the obtained results.*

*A detailed analysis of experimental and theoretical data related to the possibility of direct oxidation of molecular nitrogen with nitric acid vapor and hydrogen peroxide was carried out. To achieve this goal, a schematic diagram of a laboratory setup with modifications for the study of the Karavaev, Nagiyev, and Zakharov effects was developed. Methods for the analysis of nitrogen oxides in the gas phase and for the*

*quantitative content of nitric acid in the solution and the qualitative determination of the presence of nitrous oxide as a possible reaction product were also proposed. To implement the process of obtaining nitric acid from atmospheric air by the method of Zakharov I.I. with the use of the Karavaev and Nagiev effects, the design of the reactor assembly, consisting of a reactor tube combined with a Tesla coil and with the introduction of a regulated air flow into the discharge zone, the removal of reaction gases from the reactor tube into the pre-oxidizer-cooler and subsequent absorption with oxidation, turned out to be the most promising to nitric acid of nitrogen oxides in an absorber filled with water with the addition of hydrogen peroxide.*

*Effectively affects the increase in the concentration of nitrogen oxides in the reaction gases by reducing the air flow and improving the contact (due to the reduction in the diameter of the inlet hole or the reactor itself) of the air with the discharge of the Tesla coil or with the flame of the plasma generator. The addition of hydrogen peroxide improves the oxidation and absorption of nitrogen oxides with the formation of acid in the absorber.*

**Key words:** *nitric acid, nitrogen oxides, hydrogen peroxide, oxidation, activation energy, excited state, quantum chemical calculations.*

**Слободянюк Віктор Петрович**, аспірант кафедри хімічної інженерії та екології, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, [slobodyanyuk.viktor@plasmatec.com.ua](mailto:slobodyanyuk.viktor@plasmatec.com.ua)

**Кузьменко Андрій Володимирович**, аспірант кафедри хімічної інженерії та екології, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, [kuzmenko.andriy@plasmatec.com.ua](mailto:kuzmenko.andriy@plasmatec.com.ua)

**Целішев. Олексій Борисович**, д.т.н., професор, проректор з наукової роботи Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, [atp00@ukr.net](mailto:atp00@ukr.net)

**Лорія Марина Геннадіївна**, д.т.н., професор, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, [m\\_loria@snu.edu.ua](mailto:m_loria@snu.edu.ua)

**Кудрявцев Сергій Олександрович**, к.т.н., доцент кафедри хімічної інженерії та екології, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, [kudriavcev@snu.edu.ua](mailto:kudriavcev@snu.edu.ua)

**Дуришев Олександр Андрійович**, аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, [duryshev@ukr.net](mailto:duryshev@ukr.net)

Стаття подана 27.09.2023.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2023-279-3-45-53>

УДК 681.5.08;681.05.011

## МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМІ «СОНЯЧНА ПАНЕЛЬ-ОХОЛОДЖУВАЧ»

Тарасов В.Р., Сотнікова Т.Г., Асманкіна А.А.

## SIMULATION OF THE TEMPERATURE PROCESSES IN THE «SOLAR PANEL-COOLER» SYSTEM

Tarasov V.R., Sotnikova T.G., ASMANKINA A.A.

*В роботі представлено результати дослідження лабораторної установки для охолодження повітря, яка використовує в якості джерела живлення сонячну енергію. Проведено більше ніж 20 дослідів з активною вентиляцією та без неї у різні пори року. Отримано практичні данні та розраховані за формулами теплові процеси. Був сформульований висновок, що до елемента Пельтьє.*

*Людству необхідно все більше енергії, тому з'являється необхідність у дослідженні та впровадженні альтернативних джерел енергії. Наприклад, енергоспоживання України січень-вересень 2021 року становило 86,2 млрд кВт·год а за січень-вересень 2022 року становило 92,2 млрд кВт·год – це на 6,9% більше. Та з кожним роком ця цифра (енергоспоживання) буде зростати, особливо при умовах посягань агресора. Цю вживану потужність з кожним роком буде все важче генерувати за рахунок викопного палива такого як: нафта, вугілля, газ, уран та інші. Проте діють різноманітні "зелені технології" через які українці почали активніше встановлювати сонячні панелі, тощо. Наприклад, у 2021 році, близько 15 000 сімей встановили сонячні батареї, повідомляє прес-служба Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження. Це майже вдвічі більше, ніж за рік до того. Загалом на кінець 2021 близько 45 000 сімей використовували сонячні панелі.*

*Метод прямого перетворення сонячного випромінювання в електрику є, по-перше, найбільш зручним для споживача, оскільки отримується найбільш вживаний вид енергії, і, по-друге, такий метод вважається екологічно чистим засобом одержання електроенергії на відміну від інших, які використовують органічне паливо, ядерну сировину чи гідроресурси.*

*Використання сучасних технологій сприятиме не лише підвищенню ефективності тепличного*

*господарства, але й зменшенню екологічного впливу на навколишнє середовище.*

*Отримані данні є корисними та важливими для подальшого використання: елемент Пельтьє має низький COP, але при відсутності альтернатив, його використання є доцільним. Отримані гарні результати - установка живилася за рахунок сонячної енергії, що робить інші види систем охолодження повітря в приміщенні, в перспективі, незалежними від централизованого електропостачання та/або мобільними.*

**Ключові слова:** моделювання теплових процесів, сонячні панелі, відновлювані джерела енергії, елемент Пельтьє, вимірювання.

**Вступ.** Одна із загальних проблем людства полягає в адаптації до зміни клімату, створення комфортних умов для роботи і життя. Актуальним при цьому є скорочення використання викопних видів палива, перехід на альтернативні відновлювані джерела енергії. Одним з перспективних джерел такої енергії є сонячна енергія [1]. Найбільша потреба у охолодженні виникає, коли сонячна радіація теж найінтенсивніша, тобто у літню пору року.

Різні типи систем охолодження повітря використовують різні джерела живлення. В більшості з них, таких як кондиціонери, адіабатичне охолодження і холодна стеля, для живлення використовується електроенергія. Однак абсорбційні холодильні машини можуть використовувати як джерело енергії електроенергію, так і газ, бензин, дизельне паливо, тверде паливо або навіть сонячну енергію. Кожен тип системи охолодження має свій власний діапазон мінімальної

та максимальної потужності. Наприклад, абсорбційні холодильні машини можуть генерувати від 100 кВт до 12 МВт охолоду, в то час як кондиціонери можуть генерувати від 0,5 кВт до 20-30 кВт охолоду.

Згідно з теоретичними розрахунками, встановлено, що влітку, приміщення площею близько 10 м<sup>2</sup>, включаючи комп'ютер і присутню людину, споживатиме приблизно 1.55 кВт енергії на охолодження. Тому розглянуто можливість використання елемента Пельтьє для охолодження. Цей елемент має декілька переваг, таких як живлення від електроенергії, відсутність механічних компонентів та компактні розміри. Крім того, як джерело живлення були обрані сонячні панелі із коефіцієнтом конверсії наближено 25%, так як використання сонячної енергії з метою охолодження та /або обігріву приміщень – це на сьогодні перспективна ідея, яка набирає популярності і втілюється в різноманітних технічних рішеннях.

Окрім використання сонячної енергії на живлення пристрою для охолодження або нагріву повітря, так й на живлення приладів в будинку. Так як зараз нерідкі повідомлення про векторні відключення енергосистем через перевантаження від включених кондиціонерів. Це аргумент на користь децентралізації джерел генерації енергії та розвитку розподілених енергосистем [2].

#### **Огляд літератури.**

Термоелектричні модулі або елементи Пельтьє знаходять широке використання завдяки їх можливості створювати температурний градієнт між своїми поверхнями під впливом електричного струму. Ось кілька галузей застосування цих елементів:

- Регулювання температури: Одним з найширше застосовуваних методів використання елементів Пельтьє є регулювання температури. Вони використовуються у системах охолодження та нагріву, таких як холодильники, кондиціонери повітря, термокамери, а також системи підтримання температури для лазерів, оптики та інших пристроїв. Елементи Пельтьє можуть бути вбудовані у персональні системи обігріву для одягу або взуття, що може бути корисним для забезпечення комфортної температури в холодну погоду[3, 4].

- Медичне використання: Елементи Пельтьє застосовуються в медичній техніці для регулювання температури обладнання, такого як інкубатори для новонароджених, системи кріохірургії та діагностичне обладнання. Також вони використовуються для обігрівання медичних

пристроїв, наприклад, інфузійних систем, які потребують підтримки певної температури для медичних рідин. Елементи Пельтьє виявляють свою ефективність у використанні в інкубаторах для догляду за новонародженими[5].

- Астрономія та космічна індустрія: Елементи Пельтьє використовуються для забезпечення охолодження оптичних і детекторних систем на космічних апаратах та земних телескопах. Вони сприяють зниженню теплового шуму й підвищенню чутливості приладів. Контроль температури в критичних сегментах: Елементи Пельтьє використовуються для нагрівання деяких критичних зон, таких як обладнання у космічних апаратах або наукових установках, де важливо забезпечувати постійну температуру для нормальної роботи. У сфері лазерної техніки елементи Пельтьє можуть використовуватися для охолодження лазерних діодів та інших складових лазерних систем, що підвищує їхню продуктивність та тривалість служби. Можуть використовуватися для охолодження і обігріву сидінь та інших частин повітряних і автомобільних салонів[6].

- Енергетика: У певних випадках елементи Пельтьє використовуються для конвертації тепла у електричну енергію, таких як термоелектричні генератори, які можуть перетворювати тепло на електричну енергію[7, 8].

- Обігрівання різних об'єктів електроніки: Елементи Пельтьє можна використовувати для нагрівання електроніки, водонагрівачів, труб, датчиків та інших об'єктів, де важливо підтримувати конкретну температуру. Цей метод може знайти застосування в техніці, автомобільній промисловості, а також у промислових та наукових дослідженнях. Обігрівання у вакуумних камерах: Елементи Пельтьє можуть служити для нагрівання у вакуумних камерах, що є важливим у вакуумних дослідженнях, виробництві електроніки або обробці матеріалів в специфічних умовах[9, 10].

- Застосування елементів Пельтьє для нагріву має свої переваги, такі як відсутність рухомих деталей, тиха робота, ефективність та точне регулювання температури. Однак цей метод не підходить для всіх сфер і може потребувати додаткового охолодження для уникнення перегріву, особливо при великих потужностях[11, 12].

Також з опрацьованої літератури можна висунути, що елемент Пельтьє часто та ефективно використовують у агроінженерії:

- Елементи Пельтьє використовуються для досягнення оптимальних температур у

теплицях, надаючи змогу охолоджувати повітря влітку і нагрівати його взимку. Це сприяє стабільному зростанню та розвитку рослин, дозволяючи забезпечити їм комфортні умови у будь-який час року[13].

- Контроль температури у системах гідропоники має велике значення для стабільного розвитку кореневої системи рослин. Елементи Пельтьє активно використовуються для регулювання температури розчинів у гідропонічних системах, забезпечуючи оптимальні умови для здорового росту рослин[14].

- У переробних підприємствах молока елементи Пельтьє можуть застосовуватися для зниження температури сирового молока. Це дозволяє зберегти його при відповідній температурі для подальшої обробки[15].

- Елементи Пельтьє застосовуються для підтримки температури в приміщеннях для птахів та тварин, забезпечуючи їм зручні умови у холодну пору року[16].

- Застосування елементів Пельтьє може сприяти збереженню сільськогосподарської продукції, такої як фрукти, овочі та квіти, шляхом контролю оптимальної температури та вологості під час їх зберігання[17].

З літературного огляду робимо висновок, що елемент Пельтьє може використовуватися у багатьох напрямках науки та техніки і є оптимальною складовою безлічі конструкцій, де потрібно ефективно та точно контролювати температуру.

Елементи Пельтьє та термоелектричні явища[11], на яких вони базуються, були предметом досліджень і вивчення багатьма вченими протягом багатьох років. Серед найвідоміших вчених і груп, які проводили дослідження в цій галузі, можна виділити:

- Жан-Шарль Пельтьє: Французький фізик, після якого отримали назву елементи Пельтьє. Він був одним із перших, хто вивчав термоелектричні явища в першій половині XIX століття.

- Андре-Марі Ампер: Французький фізик, який також вніс важливий внесок у вивчення термоелектричних ефектів;

- Томас Дж. Сісбек: Американський винахідник і вчений, який розробив і патентував перший термоелектричний модуль у 1834 році.

Сучасні дослідники і компанії: В наші дні елементи Пельтьє та термоелектричні системи досліджуються та вдосконалюються[18, 19] багатьма вченими та інженерами в усьому світі, а також виробництво та застосування цих пристроїв підтримується численними компаніями в

галузі охолодження, енергозбереження та інших сферах.

На основі вищевикладеного в роботі проведено дослідження на базі лабораторної установки, в якій використовується елемент Пельтьє для зміни температури в замкненому просторі – контейнері.

**Мета та задача.** Метою роботи є: дослідження застосування системи, в якій спільно використовується елемент Пельтьє та сонячна панель, для охолодження та нагріву повітря в приміщенні.

Для вирішення цієї мети потрібно розв'язати такі задачі:

- зібрати установку для охолодження повітря з використанням в якості живлення установки сонячної панелі;

- провести іспити з працездатності установки;

- провести розрахунки теплових процесів;

- вирахувати COP системи.

**Основний матеріал.** На підставі досвіду інших дослідників та отримавши дані в роботі [20] була розроблена лабораторна установка, яка використовує в якості живлення електроенергію згенеровану сонячними панелями, та елемент Пельтьє, в якості елемента, який охолоджує повітря в замкненому просторі.

Для установки, яка зображена на Рис.1, було обрано сонячну панель потужністю 25Вт, елемент Пельтьє потужністю 72Вт, який працював на потужності ~8 Вт., датчики: комбінований датчик температури та вологості DHT-22 – 2 шт, терморезистор к-типу – 1 шт, радіатор центрального процесора – 2 шт, яким було обрано мікроконтролер на базі Arduino Uno. Корпус установки – пластиковий контейнер об'ємом 0,005 м<sup>3</sup> літрів який ззовні був утеплений пінопластом з металевією фольгою. Площа установки становила 0,052 м<sup>2</sup>, а об'єм 0,005 м<sup>3</sup>.

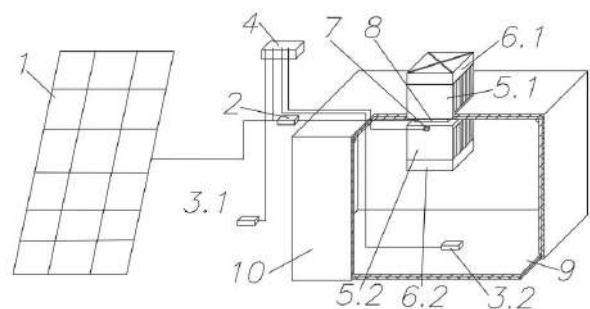


Рис. 1. Схематичне зображення експериментальної лабораторної установки

На схематичному зображенні лабораторної установки є такі елементи: 1. Сонячна панель; 2. Реле; 3.1-3.2 – Комбіновані датчики температури та вологості; 4. Мікрокомп'ютер; 5.1-5.2 Радіатор; 6.1-6.2 – Вентилятор; 7. – Терморезистор; 8. –

Елемент Пельтьє; 9. – Корпус установки; 10. – Утеплювач пінопластовий.

Головна ідея дослідження полягає у використанні сонячної енергії для забезпечення охолодження повітря в приміщенні.

Для різних систем охолодження потрібно адекватно та безпосередньо індивідуально обирати джерела енергії. В більшості з них (кондиціонери, адіабатичне охолодження, холодна стеля, тощо)[21, 22] використовують електроенергію змінного струму від мережі, проте це не завжди можливо. Але є можливість застосувати альтернативні джерела живлення, такі як сонячні панелі, генератори або системи зберігання енергії, щоб забезпечити незалежність від можливих перебоїв у електропостачанні та зменшити витрати на електроенергію. А обрання сонячних панелей та систем зберігання енергії нададуть можливість системі функціонувати навіть у разі відключення електромережі або аварійних ситуацій, забезпечуючи стабільне електропостачання[23].

Вплив температури оточуючого середовища на установку став менш відчутним завдяки впровадженню ізоляції, що дозволяє проводити досліди, що наближаються до реальних умов випробувань.

Таким чином, для дослідження зміни температури в замкнутому просторі була виготовлена експериментальна установка, на якій проводились наступні дослідження.

Було проведено понад двадцять експериментів, в ході яких вивчалися теплові процеси

усередині установки, як з урахуванням примусової конвекції, так і без неї. В ході цих експериментів було отримано дані з інтервалом в 60 с.

Температура в приміщенні в якій знаходилась установка становила приблизно 295 К, вологість  $\sim 44\%$ .

Отримані дані були занесені в таблиці 1 та 2. В них використовуються такі позначення:  $T_{21}$ ,  $T_{22}$  - температура в середині установки,  $T_{31}$ ,  $T_{32}$  - температура радіатора,  $T_0$  – температура навколишнього середовища.

Можна побачити з таблиці 1, що без конвекції температура в середині установки різниця температури між радіатором та повітрям в середині установки становила 8-9 К. Це свідчить про те, що: без конвекції радіатор в цих дослідах виступає в якості акумулятора холоду й, частково, віддає холод повітря.

У таблиці 2 наведено результати експериментів, проведених із використанням примусової конвекції, коли вентилятор був увімкнений на "холодному" радіаторі.

Як можна бачити із таблиці 2, використання примусової конвекції призводить до різниці в температурі між початковою температурою радіатора  $T_0$  та температурою всередині пристрою в діапазоні від 0,75 до 1,5 Кельвіна. Це свідчить про те, що відбувається ефективний обмін теплом між радіатором та повітрям всередині пристрою, і установка працює ефективніше, ніж за відсутності циркуляції повітря.

Таблиця 1

Результати дослідження без примусової конвекції в середині установки

№ досліду t, сек	1			2			10		
	$T_{21}$	$T_{31}$	$T_0$	$T_{21}$	$T_{31}$	$T_0$	$T_{21}$	$T_{31}$	$T_0$
0	296.65	294.15	295.45	296.65	294.15	295.45	297.15	294.15	295.65
60	294.9	294.15	295.55	294.9	294.15	295.55	295.15	294.15	295.75
120	292.65	294.15	295.45	292.65	294.15	295.45	293.15	294.15	295.85
180	291.15	294.15	295.35	291.15	294.15	295.35	291.15	294.15	295.85
240	289.4	294.15	295.35	289.4	294.15	295.35	289.9	294.15	295.95
300	288.15	293.15	295.45	288.15	293.15	295.45	288.15	294.15	295.85
360	286.65	293.15	295.45	286.65	293.15	295.45	287.65	293.15	295.95
420	285.4	292.15	295.45	285.4	292.15	295.45	287.15	292.15	295.85
480	284.4	292.15	295.35	284.4	292.15	295.35	286.15	292.15	295.95
540	283.65	292.15	295.35	283.65	292.15	295.35	285.15	292.15	295.85
600	283.15	291.15	295.35	283.15	291.15	295.35	284.65	291.15	295.95
720	282.4	291.15	295.35	282.4	291.15	295.35	283.65	290.15	295.85
840	281.15	290.15	295.35	281.15	290.15	295.35	282.65	290.15	295.95
960	280.65	289.15	295.35	280.65	289.15	295.35	281.65	290.15	295.85
1080	280.15	289.15	295.35	280.15	289.15	295.35	281.4	290.15	295.95
1200	279.15	288.15	295.35	279.15	288.15	295.35	281.15	289.15	295.75

Таблиця 2

Результати дослідження з примусовою конвекцією в середині установки

№ досліду t, сек	1			2			10		
	T <sub>22</sub>	T <sub>32</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>22</sub>	T <sub>32</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>22</sub>	T <sub>32</sub>	T <sub>0</sub>
0	296.65	294.15	295.65	296.65	294.15	295.45	297.65	295.15	295.65
60	293.9	294.15	295.75	294.15	294.15	295.35	296.15	294.15	295.65
120	293.65	292.15	295.85	293.4	292.15	295.55	294.9	293.15	295.65
180	292.9	292.15	295.65	292.9	292.15	295.55	293.9	293.15	295.75
240	292.15	291.15	295.55	291.9	291.15	295.45	293.9	292.15	295.55
300	291.65	291.15	295.65	291.15	290.15	295.35	292.4	292.15	295.45
360	290.9	290.15	295.65	290.4	290.15	295.45	292.4	291.15	295.35
420	290.4	290.15	295.65	290.15	290.15	295.35	292.15	291.15	295.35
480	289.9	289.15	295.65	289.4	289.15	295.35	291.65	290.15	295.35
540	289.4	289.15	295.65	289.65	289.15	295.45	291.4	290.15	295.65
600	289.4	289.15	295.65	289.15	288.15	295.55	291.15	290.15	295.45
720	288.9	288.15	295.65	288.65	288.15	295.45	290.9	289.15	295.35
840	288.4	287.15	295.65	288.15	287.15	295.45	289.65	288.15	295.25
960	287.65	287.15	295.65	287.65	286.15	295.35	289.15	288.15	295.35
1080	287.65	286.15	295.65	287.4	286.15	295.35	288.9	287.15	295.35
1200	286.9	286.15	295.65	286.9	286.15	295.35	287.65	286.15	295.45

На рис.2 представлений усереднений графік значень з 20 дослідів з використанням примусової конвекції та без неї.

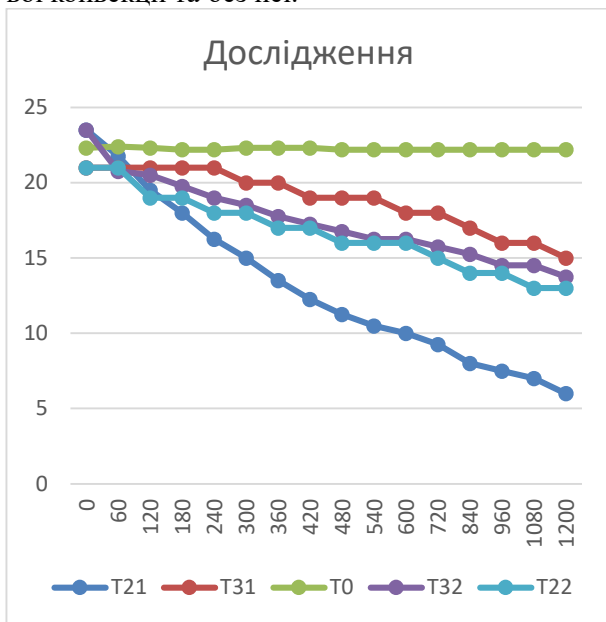


Рис. 2. Зміна температури з часом

На графіках (Рис.2.) позначено: T<sub>21</sub> - температура радіатора без конвекції, T<sub>31</sub> - температура в середині установки без конвекції, T<sub>0</sub> - температура навколишнього середовища, T<sub>32</sub> - температура радіатора з конвекцією, T<sub>22</sub> - температура в середині установки з конвекцією.

В запропонованій системі має місце декілька перетворень енергії.

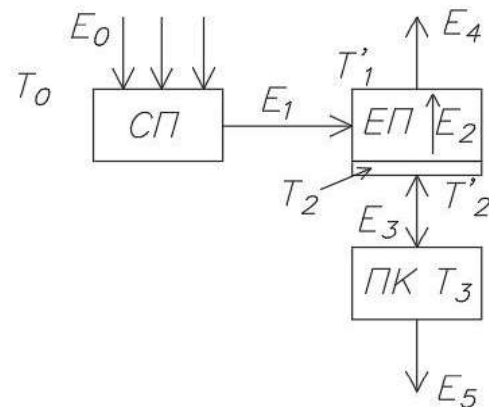


Рис. 3. Схема перетворень енергії

На рис.3 використовуються позначення: E<sub>0</sub> – енергія сонячного випромінювання, що надійшла до сонячної панелі(СП), E<sub>1</sub> – енергія електричного струму, що надійшла з сонячної панелі до елемента Пельтьє(ЕП), E<sub>2</sub> – теплова енергія перенесена з однієї сторони елемента Пельтьє на іншу, E<sub>3</sub> – теплова енергія .що надійшла з повітря до радіатора, котрий прикріплений до елемента Пельтьє, E<sub>4</sub> – енергія теплообміну на елементі Пельтьє та навколишнього середовища, E<sub>5</sub> – енергія теплообміну, що впливає на контейнер та навколишнє середовище, T<sub>0</sub> – температура навколишнього середовища, T<sub>1</sub> – температура на верхній стороні елемента Пельтьє, T<sub>2</sub> – температура на нижній стороні елемента, T<sub>2</sub> – температура на радіаторі, котрий щільно прикріплений до елемента, T<sub>3</sub> – температура всередині контейнера ПК.

В елементі Пельтьє виконується перерозподіл енергії. За рахунок контакту нижньої сторони елемента з повітрям в контейнері, повітря контейнера віддає енергію  $E_3$ . Крім того відбувається процес розсіювання теплової енергії навколишньому середовищу  $E_4$  і  $E_5$ . Але за рахунок теплоізоляції, будемо вважати, що  $E_5$  прагне до 0.

Будемо вважати, що  $T_2'$  на нижній стороні елемента дорівнює температурі верхній поверхні радіатора, яка знаходиться в безпосередньому контакті з елементом і вимірювальною термопарою  $T_2$ . Температура повітря в контейнері  $T_3$  вимірюється датчиком див. Рис. 1.

Без врахування втрат енергії можна записати відповідно до закону збереження енергії

$$E_0 = E_1 = E_2 = E_3 + E_4 + E_5 \quad (1)$$

Разом з тим враховуючи втрати енергії (ККД) формула (1) буде мати вигляд

$$\left. \begin{aligned} E_0 &= \frac{E'_1}{\eta_1} \\ E'_1 &= \frac{E'_2}{\eta_2} \\ E'_2 &= E_3 + E_4 + E_5 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де  $E'_1, E'_2$  - практично отримана енергія з врахуванням ККД.

Якщо припустити, що

$$E_5 \rightarrow 0 \quad (3)$$

то  $E'_2 = E_3 + E_4$

Енергія  $E_3$  відповідає кількості теплоти  $Q$ , що передана повітрям в контейнері елементу Пельтьє.

Енергія  $E_4$  відповідає кількості теплоти  $Q$ , що передана елементом Пельтьє повітрям ззовні контейнера.

Припустимо, що  $E_3$  буде дорівнювати  $E_4$ , так як відбувається перенос енергії без втрат.

В дослідженнях без конвекції використання елемента Пельтьє зменшило температуру повітря з 296,65 К до 288,15 К за 1200 секунд. А в дослідженнях з примусовою конвекцією – з 296,65 К до 286,15 К за 1200 секунд.

Розглянемо 1 випадок. Без примусової конвекції.

Розрахуємо кількість тепла, яку втрачає повітря в контейнері при охолодженні на  $\Delta T$ :

$$Q = c m \Delta T \quad (4)$$

де  $c$  – питома теплоємність повітря,  $m$  – маса повітря,  $\Delta T$  – зміна температури,  $\Delta T = T_0 - T_3$

Для визначення кількості теплоти (енергії) яку зміг перенести елемент Пельтьє без примусової конвекції

$$Q = 1005 * 0,006 * (296,65 - 288,15) = 51 \text{ Дж}$$

Таким чином,  $E_3 = Q = 51$  Дж. Визначимо величину  $E'_1$ , електричну енергію, яка фактично пішла на роботу елемента Пельтьє:

$$E'_1 = \frac{E'_2}{\eta_2} = \frac{E_3 + E_4}{\eta_2} = \frac{51 + 51}{0,35} = 291 \text{ Дж}$$

Тобто, на охолодження контейнера  $0,005 \text{ м}^3$  з 296,65 до 288,15 К було використано 291 Дж енергії на перенос 51 Дж за 1200 с.

Розрахуємо ККД установки при охолодженні.

$$\eta_{\text{уст}} = \frac{E_3}{E'_1} * 100 = \frac{51}{291} * 100 = 17,52\%$$

Розрахуємо EER [24] установки. EER - індекс енергетичної ефективності при роботі на охолодження. Він вказує відношення нагрівання або охолодження до кількості спожитої для цього електроенергії. Для цього використовуємо формулу:

$$EER = \frac{Q_x}{N_{\text{спож}}} = \frac{E_3}{E'_1}, \quad (5)$$

де  $Q_x = E_3$  – енергія холодопродуктивності,  $N_{\text{спож}} = E'_1$  – енергія споживання.

Для визначення коефіцієнту перетворення (EER) для охолодження без конвекції:

$$EER = \frac{51}{291} = 0,18$$

Розглянемо 2 випадок. З примусовою конвекцією.

Для визначення кількості теплоти (енергії) яку зміг перенести елемент Пельтьє з конвекцією за формулою (4)

$$Q = 1005 * 0,006 * (296,65 - 286,15) = 63 \text{ Дж}$$

Таким чином, в цьому випадку  $E_3 = Q = 63$  Дж. Визначимо величину  $E'_1$ , електричну енергію, яка фактично пішла на роботу елемента Пельтьє:

$$E'_1 = \frac{E'_2}{n_2} = \frac{E_3 + E_4}{n_2} = \frac{63 + 63}{0,35} = 360 \text{ Дж}$$

Тобто, на охолодження контейнера  $0,005 \text{ м}^3$  з  $296,55$  до  $286,15 \text{ К}$  було використано  $360 \text{ Дж}$  енергії на перенос  $63 \text{ Дж}$  за  $1200$  секунд.

Розрахуємо ККД для охолодження.

$$n_{\text{уст}} = \frac{E_3}{E'_1} * 100 = \frac{63}{360} * 100 = 17,5\%$$

Для визначення коефіцієнту перетворення ( $EER$ ) для охолодження з примусовою конвекцією скористаємося формулою (5):

$$EER = \frac{63}{360} = 0,18$$

Як можна побачити, що елемент Пельтьє має досить низький  $EER$  [26, 27], в порівнянні з кондиціонерами масового виробництва, які мають  $EER/COP$  від  $4.1$  до  $8.5$ . Виходячи з цього можна припустити, що елемент Пельтьє більш пристосований для охолодження та/або обігріву повітря в приміщеннях невеликих об'ємів, де економія електроенергії не є пріоритетом, зокрема теплиці [28].

**Висновки.** Після створення та введення в дію установки отримані результати відповідають очікуванням. За аналізом цих даних були обчислені Коефіцієнти Одиниці Потужності  $EER$  установки: для процесу охолодження –  $0,18$  без примусової конвекції та  $0,18$  з примусовою конвекцією та ККД, яке становило  $17,5\%$ .

Основним спрямуванням подальших досліджень є розробка моделі, що враховує всі аспекти теплових перетворень, і може бути застосована для розробки системи автоматичного керування температурними режимами для різних об'єктів.

### Література

1. Михненко С. Охолодження з використанням сонячної енергії [Електронний ресурс] / Сергій Михненко. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://aw-therm.com.ua/solnechnoe-ohlazhdenie/>.
2. Переваги приватної сонячної електростанції [Електронний ресурс]. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://ecotechnica.com.ua/stati/5126-plyusy-i-minusy-solnechnykh-batarej-v-chastnom-dome-10-samykh-vazhnykh-faktov-kotorye-nuzhno-uchest.html>.
3. Journal of ELECTRONIC MATERIALS, Vol. 48, No. 9, 2019 <https://doi.org/10.1007/s11664-019->

- 06952-x 2019 The Minerals, Metals & Materials Society
4. T. Wey, in IEEE North-East Workshop on Circuits and Systems (2006), pp. 277–280.
5. Casado A. R. Experimental and Computational Model for a Neonatal Incubator with Thermoelectric Conditioning System [Електронний ресурс] / Casado // mdpi. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/17/5278>.
6. Елемент Пельтьє для обдува сидіння [Електронний ресурс]. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://klifex.ua/ehlement-pelte-dlya-motora-ob-duva-sideniya-ford-fusion-mondeo-explorer>.
7. V. Milanovic, M. Hopcroft, C. Zincke, M. Zaghoul, and K.S.J. Pister, Thermic 2000, International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (2000), pp. 1–5
8. GM250-127-14-10 Thermoelectric generator module data sheet, European Thermodynamics Limited (2017).
9. Alasir, Solder alloys: physical and mechanical properties, [http://alasir.com/reference/solder\\_alloys/162](http://alasir.com/reference/solder_alloys/162). Accessed 2 Jan 2018
10. L. Technologies, Thermoelectric handbook, 2014.
11. TECA, Thermoelectric air conditioner applications, 2015.
12. O. Sullivan, B. Alexandrov, S. Mukhopadhyay, and S. Kumar, 3d compact model of packaged thermoelectric coolers, Journal of Electronic Packaging, 135, 031006 (2013).
13. КОЦЮРБА В. «Автоматизована система вирощування рослин, чутливих до абіотичних факторів / В. КОЦЮРБА. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 69 с.
14. Система охолодження та нагріву на базі елемента пельтьє в гідропонних установках [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://jahforum.net/topic/77865-sistema-ohlazhdeniya-v-indore-svoimi-rukami-sistema-ohlazhdeniya-kompota-v-sistemah-gidropo-niki/?tab=comments>.
15. Охолоджувач для молока на основі елемента Пельтьє [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://jura.com.ua/ohladitel-moloka-jura-cool-control-11-whiteea>.
16. Забезпечення оптимальної температури для птахів на основі елемента Пельтьє [Електронний ресурс]. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: <https://dv-expert.org/laboratornoe-oborudovanie/inkubator/memmert/inkubator-s-ohlazhdeniem-memmert-ipp-110-1081-ot-0-s-do-70-s-singledisplay>.
17. Пристрій на базі елемента пельтьє для збереження сільгосп продукції [Електронний ресурс]. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: [https://www.moyo.ua/ua/news/kak\\_sdelat\\_samodelnuyu\\_holodilnik\\_v\\_domashnih\\_usloviyah.html](https://www.moyo.ua/ua/news/kak_sdelat_samodelnuyu_holodilnik_v_domashnih_usloviyah.html).
18. M. V. Manno, ON-CHIP THERMOELECTRIC HOTSPOT COOLING, Ph.D. thesis, University of Maryland, 2015.

19. Дослідження термоелектричних охолоджувачів, що працюють з безперервними імпульсами струму. Перетворення та керування енергією Ма, Мін; Ю, Цзяньлінь; Чень, Цзяхен том. 98, стор. 275 – 281, 2015.
20. Cheng, C.H., Huang, S.Y., Cheng, T.C., 2011. A three-dimensional theoretical model for predicting transient thermal behavior of thermoelectr
21. Тарасов В. Р. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ ПРИМІЩЕННЯ / В. Р. Тарасов, Т. Г. Сотнікова. // ВІСНИК СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ імені Володимира Даля. – 2021. – С. 42–46.
22. Zhang, H.Y., 2010. A general approach in evaluating and optimizing thermoelectric coolers. *Int. J. Refrigeration* 33 (6), 1187-1196.
23. JA Chavez, JA Ortega, J. Salazar, A. Turo, MJ Garcia, SPICE модель термоелектричних елементів, включаючи теплові ефекти. У матеріалах 17-ї конференції приладобудування та вимірювальних технологій IEEE, 2000, стор. 1019-23.
24. Коефіцієнт EER [Електронний ресурс]. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://dbuy.ua/stati/koeffitsient-energoeffektivnosti/>.
25. Коефіцієнт COP [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://dbuy.ua/stati/koeffitsient-energoeffektivnosti/>.
26. Bollati E. Generadores termoeléctricos: Generación de energía sin partes móviles Corporex S.A (2007-01-0121 (2007)
27. Kumar S., Mahto D. Thermal analysis and performance evaluation of peltier module *Renew Energy Innov Technol* (2019), pp. 173-184
28. Yang Z., et al. Improved thermoelectric generator performance using high temperature thermoelectric materials
- WCXTM 17: SAE world congress experience: 2017-01-0121 (2017)
29. Efficiency in thermoelectric generators based on Peltier cells [Електронний ресурс] / Luigi O. Freire, Luis M. Navarrete, Byron P. Corrales, Jessica N. Castillo // *sciencedirect*. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721007022>.
3. *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*, Vol. 48, No. 9, 2019 <https://doi.org/10.1007/s11664-019-06952-x> 2019 The Minerals, Metals & Materials Society
4. T. Wey, in *IEEE North-East Workshop on Circuits and Systems* (2006), pp. 277–280.
5. Casado A. R. Experimental and Computational Model for a Neonatal Incubator with Thermoelectric Conditioning System [Elektronnyi resurs] / Casado // *mdpi*. – 2021. – Rezhym dostupu do resursu: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/17/5278>.
6. Element Peltie dlia obduva sydinnia [Elektronnyi resurs]. – 2020. – Rezhym dostupu do resursu: <https://klifex.ua/ehlement-pelte-dlya-motora-obduva-sideniya-ford-fusion-mondeo-explorer>.
7. V. Milanovic, M. Hopcroft, C. Zincke, M. Zaghoul, and K.S.J. Pister, *Therminic 2000*, International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (2000), pp. 1–5
8. GM250-127-14-10 Thermoelectric generator module data sheet, European Thermodynamics Limited (2017).
9. Alasir, Solder alloys: physical and mechanical properties, [http://alasir.com/reference/solder\\_alloys/162](http://alasir.com/reference/solder_alloys/162). Accessed 2 Jan 2018
10. L. Technologies, *Thermoelectric handbook*, 2014.
11. TECA, *Thermoelectric air conditioner applications*, 2015.
12. O. Sullivan, B. Alexandrov, S. Mukhopadhyay, and S. Kumar, 3d compact model of packaged thermoelectric coolers, *Journal of Electronic Packaging*, 135, 031006 (2013).
13. KOTsIuRBA V. «Avtomatyzovana systema vyroshchuvannia roslyn, chutlyvykh do abiotychnykh faktoriv / V. KOTsIuRBA. – Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2020. – 69 s.
14. Systema okholodzhennia ta nahrivu na bazi elementa peltie v hidroponnykh ustanovkakh [Elektronnyi resurs]. – 2021. – Rezhym dostupu do resursu: <https://jahforum.net/topic/77865-sistema-ohlazhdeniya-v-indore-svoimi-rukami-sistema-ohlazhdeniya-kompota-v-sistemah-gidroponiki/?tab=comments>.
15. Okholodzhuvach dlia moloka na osnovi elementa Peltie [Elektronnyi resurs]. – 2021. – Rezhym dostupu do resursu: <https://jura.com.ua/ohladitel-moloka-jura-cool-control-11-whiteea>.
16. Zabezpechennia optymalnoi temperatury dlia ptakhiv na osnovi elementa Peltie [Elektronnyi resurs]. – 2022. – Rezhym dostupu do resursu: <https://dv-expert.org/laboratornoe-oborudovanie/inkubator/memmert/inkubator-s-ohlazhdeniem-memmert-ipp-110-1081-ot-0-s-do-70-s-singledisplay>.
17. Prystrii na bazi elementa peltie dlia zberezhennia silhosp produktsii [Elektronnyi resurs]. – 2017. – Rezhym dostupu do resursu: <https://www.moyo.ua/ua/news/kak-sdelat-samodelnyi-holodilnik-v-domashnih-usloviyah.html>.

### References

18. M. V. Manno, ON-CHIP THERMOELECTRIC HOTSPOT COOLING, Ph.D. thesis, University of Maryland, 2015.
19. Doslidzhennia termoelektrychnykh okholodzhuvachiv, shcho pratsiuiut z bezperervnymy impulsamy strumu. Peretvorennia ta keruvannia enerhiieiu Ma, Min; Yu, Tszianlin; Chen, Tziakhen tom. 98 , stor. 275 – 281 , 2015 .
20. Cheng, C.H., Huang, S.Y., Cheng, T.C., 2011. A three-dimensional theoretical model for predicting transient thermal behavior of thermoelectr
21. Tarasov V. R. ANALIZ SUCHASNOHO STANU SYSTEM OKHOLODZHENNIa PRYMISHchENNIa / V. R. Tarasov, T. H. Sotnikova. // VISNYK SKHIDNOUKRAINSKOHO NATSIONALNOHO UNIVERSYTETU imeni Volodymyra Dalia. – 2021. – S. 42–46.
22. Zhang, H.Y., 2010. A general approach in evaluating and optimizing thermoelectric coolers. Int. J. Refrigeration 33 (6), 1187-1196.
23. JA Chavez, JA Ortega, J. Salazar, A. Turo, MJ Garcia, SPICE model termoelektrychnykh elementiv, vkluchaiuchy teplovi efekty. U materialakh 17-i konferentsii pryladobuduvannia ta vymiriuvalnykh tekhnolohii IEEE , 2000, stor. 1019-23.
24. Koefitsiient EER [Elektronnyi resurs]. – 2020. – Rezhym dostupu do resursu: <https://dbuy.ua/stati/koeffitsient-energoeffektivnosti/>.
25. Koefitsiient COP [Elektronnyi resurs]. – 2021. – Rezhym dostupu do resursu: <https://dbuy.ua/stati/koeffitsient-energoeffektivnosti/>.
26. Bollati E. Generadores termoeléctricos: Generación de energía sin partes móviles Corporex S.A (2007-01-0121 (2007)
27. Kumar S., Mahto D. Thermal analysis and performance evaluation of peltier module Renew Energy Innov Technol (2019), pp. 173-184
28. Yang Z., et al. Improved thermoelectric generator performance using high temperature thermoelectric materials WCXTM 17: SAE world congress experience: 2017-01-0121 (2017)
29. Efficiency in thermoelectric generators based on Peltier cells [Elektronnyi resurs] / Luigi O. Freire, Luis M. Navarrete, Byron P. Corrales, Jessica N. Castillo // sciencedirect. – 2021. – Rezhym dostupu do resursu: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721007022>.

**Tarasov V., Sotnikova T., Asmankina A.**

#### **Simulation of the temperature processes in the «solar panel-cooler» system**

*The laboratory research results fluidizer is in-process presented air cooling, which uses sun energy in quality the source of feed. 20 experiments are conducted more than with active ventilation and without it in*

*different times of year. The practical is got data and thermal processes are expected after formulas.. There was the formed conclusion, that to the Peltier element.*

*Humanity needs more energies, that is why a necessity appears for research and introduction of alternative energy sources. For example, energy consumption in Ukraine was January-September, 2021 made by 86,2 billion kWh and for January-September, 2022 did make 92,2 billion kWh – it on 6,9% anymore. But every year this number (energy consumption) will grow, especially at the aggressor's encroachments terms. This common power with every year will all heavier generate due to the fossil fuel: oil, coal, gas, uranium, and others. Due to information about "green technologies" Ukrainians began more active to set sun panels and alike facilities. For example, in 2021 year, about 15 000 users were set by sun batteries, the State agency from energy-savings press-service reports. This is almost twice as much as the year before. In total, by the end of 2021, about 45,000 families used solar panels.*

*The direct conversion of solar radiation into electricity method is, firstly, the most convenient for the consumer, since the most used type of energy is obtained, and, secondly, this method is considered an environmentally friendly means of obtaining electricity, unlike others that use organic fuel, nuclear raw materials or water resources.*

*The use of modern technologies will contribute not only to increasing the efficiency of greenhouse farming, but also to reducing the ecological impact on the environment.*

*The obtained data are useful and important for further use: the Peltier element has a low COP/EER, but in the absence of alternatives, its use is reasonable. Satisfactory results obtained - the installation was powered by solar energy, which makes other types of indoor cooling systems, in the future, independent of centralized power supply and/or mobile.*

**Keywords:** *thermal processes modeling, solar panels, renewable energy sources, Peltier element, measurement.*

**Тарасов Володимир Русланович** – аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, асистент комп'ютерно-інтегрованих систем управління Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, [tarasov\\_v@snu.edu.ua](mailto:tarasov_v@snu.edu.ua)  
**Сотнікова Тетяна Генадіївна** – к.т.н., доц., кафедри кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля  
**Асманкіна Анастасія Анатоліївна** - асистент кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2023-279-3-54-61>

УДК621.39

## ПРОБЛЕМИ ЗАСТОСУВАННЯ STARLINK В УКРАЇНІ В УМОВАХ ВІЙСЬКОВОГО СТАНУ

Тюндер І.С.

## PROBLEMS OF USING STARLINK IN UKRAINE UNDER THE CONDITIONS OF MARITAL STATE

Tyunder I.S.

*У статті розглядаються проблеми та перспективи проекту супутникового зв'язку STARLINK, а також застосування STARLINK В Україні.*

*Супутниковий інтернет - спосіб забезпечення доступу до Інтернету з використанням технології супутникового зв'язку.*

*Глобальне покриття Землі недорогим високошвидкісним інтернет-доступом створить нові можливості у сферах освіти, транспорту, туризму, будівництва.*

*Компанія SpaceX Глона Маска стала однією з найвпливовіших у сфері космічних технологій та відкриттів. Найуспішніший проект компанії Маска - Starlink - отримав широке визнання та відкрив нові можливості для забезпечення доступу до швидкого інтернету, зокрема в умовах бойових дій в Україні. Його широко застосовують Збройні сили України (ЗСУ), деокуповані громади, журналісти, і не тільки.[1]*

*Передзамовлення на супутниковий інтернет Starlink SpaceX відкрила в лютому 2021 року для перших країн - США, Канади та Великобританії. Для України доступ до нього був запланований на 2022. Проте напад РФ значно прискорив цей процес.*

*Зазначається, що при очікуваному зростанні мережі Starlink, яка складатиметься з 42 000 супутників, - на орбіті дуже швидко стане тісно. Це створить загрозу для інших супутників, а також перешикодить астрономічним спостереженням із Землі.*

*Вже нині на супутники Starlink покладають відповідальність за більшість інцидентів з загрозою зіткнення з іншими супутниками.*

*Також проблемою є порівняно короткий термін роботи супутників Starlink, яких вистачає лише приблизно на п'ять років.*

*Звернено увагу на те, що Starlink має труднощі з обслуговуванням і сервісом, неможливість змінити дані акаунта власника, про що регулярно пишуть не лише українці, а й користувачі з інших країн. Біійці ЗСУ розповідають «Тижню» й про інші складнощі роботи терміналів, серед яких обмежена мобільність (можливість користуватися не в першій точці під'єднання). Це часто призводило до того, що безліч Starlink - терміналів, зокрема отриманих українськими Силами оборони, перетворилися на брухт: їх*

*неможливо використовувати за призначенням у потрібному місці.*

*Крім проблем проекту STARLINK, очікується, що впровадження мережі Starlink в Україні є великим кроком вперед у подоланні цифрового розриву та наблизенні країни до досягнення повного доступу до Інтернету. Цей проект обіцяє стати благом для народу України та слугуватиме прикладом того, як технології покращують життя.*

**Ключові слова:** Інтернет, супутниковий зв'язок, SpaceX, STARLINK, Україна, Збройні сили України.

**Вступ.** Передача інформації - фізичний процес, за допомогою якого здійснюється переміщення інформації в просторі.

Інтернет є найкращим прикладом безлічі мереж передавання.

Супутниковий Інтернет існує багато років. Його роботу забезпечують кілька угруповань супутників, що належать різним десятків міжнародним компаніям.

Недоліки сучасного супутникового Інтернету полягають у високій вартості передавання даних, дорогому приймально-передавальному устаткуванню, великих затримках сигналу - 600-800 мілісекунд, порівняно невисокій швидкості передавання даних і невеликій кількості каналів, доступних на одному супутнику. [2]

Starlink – проект американської компанії SpaceX щодо розробки високопродуктивної супутникової платформи для виготовлення супутників зв'язку та запусків великої їх кількості (сузір'я) у космос (рис.). Система надає доступ до широкосмугового Інтернету у будь-якій точці планети.



Рис. Супутникова система Starlink

Назва “Starlink” взята із роману Джона Гріна “Провина зірок”. Проект почався у 2015 році, а перші два супутники було запущено у тестовий політ 22 лютого 2018 року ракетою Falcon 9. Запуск наступної партії сателітів вже із 60-ти одиниць відбувся у травні 2019 року. У січні 2020 року SpaceX стала власницею найбільшої кількості супутників на орбіті (180 штук). До середини 2020-х років компанія планувала відправити на певні орбіти близько 12 тисяч апаратів, однак у 2019 році з’явилася інформація про заявку на ще 30 тисяч штук.

Отже, Starlink - це глобальна супутникова система, що розгортається компанією SpaceX для забезпечення високошвидкісного супутникового доступу в Інтернет у місцях, де він був ненадійним, дорогим або повністю недоступним. [3]

Для України доступ до нього був запланований на 2022. Проте напад РФ значно прискорив цей процес. До війни SpaceX протягом 6 тижнів співпрацювала із українцями, очікуючи офіційний лист про дозвіл роботи Starlink в Україні, проте питання вирішилось всього у пару твітів.

Варто відмітити, що інтернет-мережа від SpaceX дуже стійка до кібератак – всі спроби окупантів «зламати» супутниковий зв’язок в Україні засобами радіоелектронної боротьби не увінчалися успіхом. Завдяки високій надійності, Starlink використовує і президент України Володимир Зеленський, особливо під час спілкування із політичними лідерами. Це говорить про те, що вже з перших тижнів чи навіть днів війни Starlink був для України вкрай необхідним. [4]

Starlink стає все більшим конкурентом для традиційних постачальників послуг інтернету та відкриває нові можливості для розвитку зв’язку та передачі даних.

В Україні цей проект дозволяє віддаленим громадам отримати доступ до сучасних

комунікаційних послуг та відкрити нові можливості для розвитку економіки й освіти, долаючи цифровий розрив.

**Аналіз останніх публікацій.** Питанням дослідження стану та перспектив розвитку Інтернету в Україні присвятили свою роботи Ільченко М., Kulikov Є., Кириндась Н., Лісовський К., Субботський Д., Живков О. у статті «Перспективи розвитку проекту супутникового зв’язку STARLINK в Україні». Для того, щоб послуги Starlink стали доступні в Україні, варто в першу чергу на законодавчому рівні спростити процедури сертифікації і ліцензування користувацьких терміналів, в ідеальному випадку спростивши їх до рівня, який використовується в інших країнах, які вже дозволили використання таких терміналів (на прикладі згаданих вище США, Канади, Великобританії...). [5]

Д. Міночкін, А. Нсер у статті «Огляд супутникового Інтернету STARLINK» описано супутниковий Інтернет системи Starlink, а саме побудова цієї системи та робота супутників, їх розташування та кількість, принцип роботи, технології та теперішній стан всього проекту.

У статті Т. Наритник, В. Сайко «Інноваційний спосіб супутникового зв’язку» запропонована система низькоорбітального супутникового зв’язку, яка представляє угруповання низькоорбітальних космічних апаратів (LEO-система) з архітектурою «розподіленого супутника», яке включає угруповання кореневих (провідних) супутників та супутників-ретрансляторів (ведених).

Багато уваги стану Інтернету в Україні приділяється саме на інтернет-ресурсах. Так, Н. Баловсяк у статті «Ненадійний зв’язок. Як монополія Starlink стає ризиком для України» розглядає проблеми з інтернет-доступом через супутникові термінали.

М. Поляков наголошує у статті «Історія успіху Starlink: як продати світу півтора мільйона “літаючих тарілок”», однак, у випадку Starlink є одна складова, яка ще довго гарантуватиме актуальність технології. Зацікавлення Пентагону у можливостях супутникового угруповання Starlink фактично подарувало сузір’ю нове життя та нове призначення інтернет-технологій.

**Мета статті.** Дослідити сучасні світові тенденції застосування Starlink, описати основні проблеми та перспективи розвитку. Розглянути застосування Starlink в Україні.

**Виклад основного матеріалу.** Суттєвим недоліком сучасного супутникового інтернет-доступу є велика затримка сигналу (пінг). Оскільки супутники розташовані на високій орбіті, 36 тис км, затримка сигналу може становити 600-800 мілісекунд. Для порівняння: затримка в мережах стандарту 4G становить в середньому 8 мілісекунд.

Якщо SpaceX "повісить" супутники на висоті 340-350 км, затримка сигналу в середньому буде становити 25 мілісекунд. Це набагато менше, ніж у конкурентів, але значно більше, ніж в мережі мобільного зв'язку.[6]

Розроблений компанією SpaceX, Starlink - це супутниковий ширококутовий інтернет-сервіс, який забезпечує надійний доступ до Інтернету в областях, які традиційно були недостатньо обслуговуваними або мали обмежений доступ.

Starlink використовуватиме мережу супутників на низькій навколосемній орбіті, щоб забезпечити доступ до Інтернету для користувачів по всьому світу. Очікується, що мережа забезпечуватиме швидкість до 1 Гбіт/с і може бути доступною по всій країні. Це було б величезним кроком уперед від поточної середньої швидкості близько 10 Мбіт/с. [7]

*Проблеми Starlink та їх вирішення.* Ілон Маск також "захаращує" нашу орбіту своїми приватними супутниками. У 1957 році в космос було запущено перший супутник, а до 2019 року - ще 8500 супутників. Очікується, що мережа Starlink складатиметься з 42 000 супутників - тож на орбіті дуже швидко стане дуже тісно. Це створить загрозу для інших супутників, а також перешкодить астрономічним спостереженням із Землі.

Вже нині на супутники Starlink покладають відповідальність за більшість інцидентів з загрозою зіткнення з іншими супутниками. І як тільки супутник автоматично змінює свою траєкторію, щоб уникнути можливого зіткнення, це може викликати ланцюгову реакцію, оскільки інші супутники реагують на зміну його траєкторії.

Також проблемою є порівняно короткий термін роботи супутників Starlink, яких вистачає лише приблизно на п'ять років. Навіть якщо вони потім значною мірою згоряють при вході в атмосферу Землі, необхідно постійно запускати в космос нові супутники, щоб не виникали дірки у мережі.

Наразі SpaceX масово використовує своє північне становище на ринку, щоб не допустити появи конкурентів у майбутньому. З огляду на щільність розміщення супутників, для інших конкурентів майже не залишилося місця, тим паче на близькій до Землі відстані на орбіті. Їм доведеться перебиратися на значно більш віддалені і непривабливі висоти.

Це дуже не вигідно для подібної супутникової мережі з тісною сіткою для глобального постачання швидкого інтернету, а це означає, що Starlink не має боятися конкуренції і в майбутньому. [7]

Після запуску першої великої партії Starlink у різних куточках Землі почали знімати відео із саяливими точками, що ланцюжком пролітали над планетою. Почали поширюватися чутки, ніби після підйому усього сузір'я у 12 тис. (а пізніше з'ясувалося, що їх буде 40 тис.) супутників вони стануть надто видимі на небосхилі та «засмітять» небо, перебиваючи саяво зірок. Міжнародний астрономічний союз та National Radio Astronomy Observatory також висловили свою стурбованість. [6]

Вплив Ілона Маска на глобальну геополітичну сцену занепокоїв світові держави, змусивши їх знаходити альтернативні шляхи.

Існування монополіста в такому важливому секторі, як зв'язок, пожвавило інвестиції у створення інших систем супутникового зв'язку. Наприклад, торік країни ЄС виділили €2,4 млрд на «суверенну» групу супутників, яку мають запустити вже 2027 року.

Плани створити конкурента Starlink через консорціум OnWeb зазнали невдачі, бо компанія збанкрутіла. Amazon також розробляє свою систему супутникового зв'язку. Компанія готувалася вивести на орбіту перші два супутники, але запуск зупинили, тому що виявили проблеми під час випробувань ракети.

Проте обидва потенційні гравці на ринку супутникового зв'язку поки що безнадійно відстають від можливостей компанії Маска. Нині SpaceX - єдиний у світі постачальник у своєму сегменті послуг. Проте стиль роботи компанії в Україні показав, що вважати її надійним партнером не доводиться. [8]

Китай оголосив про створення своєї першої високоорбітальної мережі супутникового зв'язку. На думку експертів, цей проект може стати гідною альтернативою програмі Starlink від компанії SpaceX.

Китай заявив про створення власного супутникового сузір'я на LEO - Guowang. Попри колосальну повільність і неповороткість, якими характерний зараз китайський космос, одного у нього точно не відняти - поступового та планомірного нарощування темпів як виробництва ракет та супутників, так і їхнього запуску на орбіту.

Погляньмо на цифри. У 2015 році КНР провела лише 19 орбітальних запусків. До кінця 2022-го ця цифра зупинилася вже на позначці 64 успішних космічних запусків (у яких на долю приватних компаній припало 25% від загальної кількості запусків).

Станом на середину 2023 року варто визнати, що Піднебесна все ж таки зробила висновки із втраченого раніше моменту з розвитком власного супутникового інтернет-сузір'я. Для цього їй, щоправда, за старою доброю комуністичною традицією, знадобилася лише одна п'ятирічка. [9]

У травні 2019 року Маск повідомив, що його команда працює над спеціальним покриттям для корпусу, що зменшить альбедо. У січні 2020 року під час запуску Starlink 2 один із супутників (його назвали «DarkSat») вже був темнішим. Тоді ж представники компанії визнали, що й самі не очікували, що навіть після підйому на 550 км їхні апарати на достатньо темному небі можна буде побачити незброєним оком. У березні 2020 року астрономи, що відстежували DarkSat, відзвітували про зменшення його яскравості на 55 %. Але цього все ще недостатньо. До того ж темна поверхня швидше нагрівається, що може скоротити термін служби сателітів.

Кожен Starlink піднімається до своєї робочої орбіти приблизно чотири місяці. У цей час його сонячні панелі розташовуються таким чином, що можуть сильно відбивати світло. Однак, опинившись на необхідній висоті, вони повертаються перпендикулярно до земної поверхні, що зменшить до мінімуму це відбиття.

Із місією Starlink 7 запустили черговий пробний супутник під назвою «VisorSat». Він має пару сонцезахисних екранів, виготовлених із легкого матеріалу, що не заважатиме проходженню радіосигналу, але не даватиме відбиватися світлу від фазованих антен. За умови його нормального функціонування, всі сателіти Starlink 9 матимуть подібні екрани. [6]

*Перспективи Starlink.* Starlink - не перша компанія, яка пропонує супутниковий Інтернет,

але вона має певні переваги, якщо порівнювати з конкурентами: супутниковий інтернет порівняно просто обслуговувати. Поток даних рухається безперервно і вражає швидко. Адже супутники Starlink обертаються навколо Землі на висоті від 328 до 614 кілометрів, що значно нижче, ніж супутники конкурентів.

Для порівняння, супутники попереднього супутникового лідера Hughesnet обертаються навколо Землі на висоті 35 000 кілометрів. Відповідно, передача даних потребує приблизно вдвітьох разів більше часу, ніж у Starlink. [6]

Вражаючим досягненням SpaceX стало введення в експлуатацію масштабної мегаконстеляції супутників Starlink. У березні 2023 року SpaceX запустила ще один блок Starlink, підвищивши загальну кількість супутників в констеляції до понад 10 тисяч. Це дозволило забезпечити доступ до швидкого Інтернету в регіонах, які раніше були віддаленими та погано покритими мережею. Starlink стає все більшим конкурентом для традиційних постачальників послуг інтернету та відкриває нові можливості для розвитку зв'язку та передачі даних.

Томас Веллінгтон, експерт із комунікації на полі бою, констатував, що вузько спрямоване широкосмугове випромінювання Starlink робить його фактично невразливим перед перехопленням та приглушенням засобами радіоелектронної боротьби (РЕБ) супротивника. Це стало можливим завдяки розміщенню супутникового угруповання на низькій навколоземній орбіті. [9]

У грудні 2022 року офіційно анонсували Starshield - мілітаризований аналог Starlink, який мав надати військовим доступне і безпечне широкосмугове з'єднання, а також здійснювати доставку корисного навантаження на орбіту для урядових і військових відомств США.

Важливо розуміти, що Starlink - це не стільки супутниковий зв'язок, скільки перевірена часом надійна технологія супутникової шини, на якій за бажанням можна розмістити різне корисне навантаження: радары, оптичні камери, інфрачервоні (ІЧ) системи сигналізації про ракетні пуски. Тож очевидно, що Пентагон зацікавлений у тому, щоб вичавити з супутників Starshield максимум функціоналу, який вони можуть надати.

Уже відомо, що супутники Starshield конструктивно відрізнятимуться від своєї цивільної версії: дві сонячні панелі замість однієї, а також більш ніж удвічі збільшені габарити самого активного супутника зв'язку. Зовні вони будуть

схожі на Starlink Block v1.5 і v2.0. Однак секретність програми передбачає, що про їхні точні технічні характеристики громадськість дізнається ще досить нескоро. Ймовірно, перші супутники угруповання Starshield вивели на орбіту під час секретної місії Globalstar FM15, яка відбулася в червні 2022 року.

Якщо у Starlink лазер служить для сполучення супутників один із одним, то чому Starshield не може використовувати його для знешкодження ракет з ІЧ-наведенням? Подібну технологію протидії ракетам із тепловим наведенням уже можна побачити на службі американських ВПС.

SpaceX звернулася до найшвидшого джерела передачі інформації у Всесвіті - світла. Швидкість розповсюдження світла, рівна 299 792 458 м/с, дозволяла за частки секунди передавати дані від одного супутника до іншого шляхом їхнього сполучення між собою перехресними лазерними міжсупутниковими каналами зв'язку (LISL). Спрощуючи, можна сказати, що такий зв'язок скидається на "стрілянину" супутників лазерними імпульсами один в одного.

Тут важливо уточнити, що не всі апарати Starlink використовують лазер для сполучення між собою. Так, супутникам першого покоління для передачі сигналу слугували радіоканали зв'язку. Перші ж зонди, в яких було реалізовано лазерний зв'язок, почали з'являтися лише у січні 2021 року, зі стартом запуску супутників версії 1.5 (v1.5).

Наразі вже очевидно, що SpaceX не зверне зі свого "шляху світла", і в майбутніх модифікаціях супутників лазерне сполучення повністю замінить радіопередачу.

Наведена модель, побудована професором Марком Гендлі, демонструє, що затримка при лазерній передачі супутникового сигналу від Нью-Йорка до Лондона становитиме всього 50 мс, тоді як оптоволоконне з'єднання буде значно повільніше - 70 мс. За збільшення дистанції перевага міжсупутникового лазерного зв'язку ще очевидніша. Так, лазерне сполучення Лондона з Сінгапуром матиме затримку сигналу 90 мс, при 159 мс у разі передачі сигналу оптоволоконним кабелем. [9]

SpaceX оголосив про запуск у 2024 році на мобільних пристроях своєї майбутньої послуги Starlink Direct to Cell, яка надаватиме зв'язок для смартфонів через супутник.

Нова функція працюватиме з існуючими телефонами високошвидкісного мобільного інтернету «скрізь, де видно небо», пише видання The Verge.

Зазначається, що у 2024 році нова послуга буде обмежена текстовими повідомленнями, але вже у 2025 році з'являться функції передачі голосу і даних, а також можливість передавати файли.

«Direct to Cell працює з існуючими телефонами LTE скрізь, де можна побачити небо. Жодних змін в апаратному забезпеченні, прошивці або спеціальних додатках не потрібно», - йдеться у повідомленні.

Супутники Starlink із функцією Direct to Cell забезпечать повний доступ до текстових повідомлень, дзвінків і перегляду вебсторінок. В компанії розповіли, що вони оснащені вдосконалим модемом eNodeB, який діє як вежа мобільного зв'язку в космосі, дозволяючи мережеву інтеграцію, подібну до стандартного роумінг-партнера. [10]

*Застосування мережі Starlink в Україні.* Партія супутників SpaceX вперше зафіксована у небі над Україною 26 травня 2019 року.

Спочатку сервіс планували активувати в Україні як мінімум 2023 року. 26 лютого 2022 року, після вторгнення Росії, міністр цифрової трансформації України Михайло Федоров у Твіттері закликав Ілона Маска надати Україні термінали і доступ до системи. Президент SpaceX Гвен Шотуелл повідомила, що перед цим компанія кілька тижнів працювала над отриманням дозволу на надання послуг Starlink в Україні.

27 лютого Маск відповів, що доступ надано, а термінали вже в дорозі, і наступного дня до України прибула перша партія. Їх розподіляють між Укрзалізницею, військовими, теробороною, територіальними громадами тощо, а також використовують для потреб критичної інфраструктури, медицини, фінансів та енергетики. 9 березня Україна отримала другу (більшу) партію, а 15 березня - третю. 18 березня енергетики компанії ДТЕК отримали ще 170 терміналів. Starlink запущено у Києві, Житомирі, Запоріжжі, Одесі, на Рівненщині та Волині. [6]

Саме завдяки терміналам, доправленим вертольотами на оточений російськими військовими металургійний комплекс "Азовсталь", світ дізнався про героїчну оборону гарнізоном цього заводу. За допомогою Starlink захисники фортеці підтримували зв'язок з артилерією, вміло

коригуючи її вогонь. Протягом 86 днів “Азов-сталь” була кісткою у горлі Путіна, перешкоджаючи йому одержати остаточний контроль над Маріуполем.

Супутниковий Інтернет дозволив ЗСУ продемонструвати блискучу взаємодію з дронами – як для розвідки, так і для ураження противника. Рано вранці 29 жовтня 2022 року угруповання чисельністю від шести до восьми одиниць (за даними Geo Confirmed), що складалося з українських безпілотних надводних суден (USV) із закріпленими на кормі приймальними антенами Starlink, здійснило показово зухвалу і результативну атаку на Чорноморський флот РФ, що базувався в окупованому Севастополі. Відтак серйозні пошкодження отримали як мінімум три російські військові кораблі, зокрема й носії гіперзвукових ракет “Калібр”. [9]

Очікується, що впровадження мережі Starlink в Україні матиме позитивний вплив на численні сектори економіки, включаючи освіту, охорону здоров’я та сільське господарство. Інтернет дозволить студентам у сільській місцевості отримати доступ до навчальних матеріалів і ресурсів, які раніше були недоступні. Це допоможе подолати освітній розрив між селом і містом.

Впровадження мережі Starlink в Україні є великим кроком вперед у подоланні цифрового розриву та наблизенні країни до досягнення повного доступу до Інтернету. Цей проєкт обіцяє стати благом для народу України та слугуватиме прикладом того, як технології покращують життя. [7]

Сьогодні Україна вже знаходиться серед країн з найбільшою кількістю терміналів Starlink. Понад 12 тисяч (а за деякими даними – 15 тисяч) пристроїв зараз підтримують нашу інфраструктуру та допомагають військовим, рятувальникам, пожежникам, лікарям та волонтерам працювати безперебійно. Проте попереду ще багато роботи.

Варто відмітити, що доступ до мережі Starlink в Україні став доступний завдяки тому, що у сусідніх країнах (найближчі до нас – Польща, Литва та Туреччина) вже встановлені наземні станції-шлюзи. Це, доречі, стало причиною того, що у західних областях України супутниковий інтернет працює краще, ніж в східних. Але вже з початку квітня Starlink почала розробляти проєкт побудови станції і у нас. Станеться це вже після перемоги, але зараз обидві сторони готують ґрунт для подальшої співпраці. По-перше,

в Україні вже зареєстровано компанію Starlink Ukraine, яка є офіційним представництвом SpaceX, а, по-друге, на початку червня компанія Starlink Ukraine отримала ліцензію оператора. Тож, крок за кроком, ми ближче до мети отримати повноцінний доступ до найбільш обговорюваної інтернет-системи у світі. [4]

**Висновки.** У сухому залишку можна побачити, як поступове розгортання сузір’я Starlink, хоча і рухається до своєї кінцевої мети (надання глобального високошвидкісного інтернету), знає шквалу праведної критики від своїх користувачів. На цей момент SpaceX не завжди здатна забезпечити людям обіцяний раніше сервіс. І можливо, якби в цій історії все трималося виключно на цивільному комерційному інтернеті, сузір’я Маска було б менш популярним.

Однак, у випадку Starlink є одна складова, яка ще довго гарантуватиме актуальність технології. Зацікавлення Пентагону у можливостях супутникового угруповання Starlink фактично подарувало сузір’ю нове життя та нове призначення. Громадянські підписки поступилися місцем пріоритетам національної безпеки. [9]

Можна прийти до висновків, що Starlink в Україні йде на користь не лише українцям, а й самій SpaceX. Адже саме зараз технологія супутникового інтернету проходить дуже потужний тест-драйв у «польових умовах», що у майбутньому допоможе зробити її ще кращою та досконалою. [4]

Особливо важливою є роль Starlink для українських військових. Умови бойових дій знижують доступність традиційних засобів зв’язку та передачі даних. Starlink може забезпечити надійний та швидкий зв’язок для командування й координації військових операцій, незалежно від географічного положення чи наявності інфраструктури. Наскільки важливим був Starlink для ЗСУ, всі могли бачити на власні у квітні-травні 2022 року, спостерігаючи за відеозверненнями українських військових з оточеної “Азовсталі” в Маріуполі. [9]

Проте відсутність альтернативи зробило Україну (та й інші країни, де треба організувати зв’язок у складних умовах) залежною від неідеального, проте єдиного доступного нині інструменту – Starlink компанії SpaceX. Автори The New York Times стверджують, що в Україні розуміють надмірну залежність від технологій Starlink і шукають альтернативу. Хоч українські чиновники спілкувалися з іншими

провайдерами супутникового інтернету, вони визнали, що жоден з них не може конкурувати зі Starlink.

Монопольне становище SpaceX стало реальною загрозою Україні, подолати яку в нинішніх умовах, на жаль, неможливо. Залишилося чекати, коли ж запрацюють європейська альтернатива й мережа супутників Amazon. [8]

### Література

1. Starlink для України і ЗСУ [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://novynarnia.com/2023/06/29/starlink-dlya-ukrayiny-i-zsu-aktualni-cziny-ta-problemy/>
2. Wi-Fi на всю планету. Яким буде глобальний супутниковий інтернет від SpaceX і OneWeb [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://www.epravda.com.ua/publications/2019/03/1/645957/>
3. Ніколаєнко Б.А., Пелешок Є.В. Сучасні супутникові системи зв'язку: навч. посібник. К.: ІСЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 146 с.
4. Як Україна використовує та адаптує Starlink в умовах війни [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://root-nation.com/ua/articles-ua/internet-ua/ua-yak-ukraina-vikoristovue-ta-adaptue-starlink-v-umovah-viyni/>
5. Льченко М., Куликов Є., Кириндась Н., Лісовський К., Субботський Д., Живков О. «Перспективи розвитку проекту супутникового зв'язку STARLINK в Україні.» [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/356776643>
6. [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Starlink>
7. Александер Фройнд Як працює Starlink і чому він викликає суперечки [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://www.dw.com/uk/ak-pracue-starlink-i-comu-vin-viklikae-superecki/a-63446839>
8. Надія Баловсяк Ненадійний зв'язок. Як монополія Starlink стає ризиком для України [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://tyzhden.ua/nenadijnyj-zv-iazok-iak-monopoliiia-starlink-staie-ryzykom-dlia-ukrainy/>
9. Макс Поляков Майбутнє Starlink: прихований військовий потенціал [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://expedicia.org/maybutnie-starlink-prikhovaniy-viyskoviy-pot/>
10. Валерій Ульяненко Нова послуга буде працювати скрізь, де можна побачити небо [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://glavcom.ua/techno/telecom/spacex-zapustit-suputnikovij-zvjazok-starlink-dlja-smartfoniv-962254.html>

### References

1. Starlink for Ukraine and the Armed Forces of Ukraine [Electronic resource] - Mode of access: <https://novynarnia.com/2023/06/29/starlink-dlya-ukrayiny-i-zsu-aktualni-cziny-ta-problemy/>
2. Wi-Fi for the whole planet. What will be the global satellite Internet from SpaceX and OneWeb [Electronic resource] - Mode of access: <https://www.epravda.com.ua/publications/2019/03/1/645957/>
3. Nikolayenko B.A., Peleshok E.V. Modern satellite communication systems: training. manual. K.: ISZZI KPI named after Igor Sikorskyi, 2022. 146 p.
4. How Ukraine uses and adapts Starlink in conditions of war [Electronic resource] - Mode of access: <https://root-nation.com/ua/articles-ua/internet-ua/ua-yak-ukraina-vikoristovue-ta-adaptue-starlink-v-umovah-viyni/>
5. Ilchenko M., Kulikov E., Kyryndas N., Lisovskyi K., Subbotskyi D., Zhivkov O. "Prospects for the development of the STARLINK satellite communications project in Ukraine." [Electronic resource] - Mode of access: <https://www.researchgate.net/publication/356776643>
6. [Electronic resource] - Mode of access: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Starlink>
7. Alexander Freund How Starlink works and why it is controversial ." [Electronic resource] - Mode of access: <https://www.dw.com/uk/ak-pracue-starlink-i-comu-vin-viklikae-superecki/a-63446839>
8. Nadia Balovsiak Unreliable connection. How the Starlink monopoly becomes a risk for Ukraine [Electronic resource] - Mode of access: <https://tyzhden.ua/nenadijnyj-zv-iazok-iak-monopoliiia-starlink-staie-ryzykom-dlia-ukrainy/>
9. Max Polyakov The future of Starlink: hidden military potential [Electronic resource] - Mode of access: <https://expedicia.org/maybutnie-starlink-prikhovaniy-viyskoviy-pot/>
10. Valeriy Ulyanenko The new service will work wherever you can see the sky [Electronic resource] - Mode of access: <https://glavcom.ua/techno/telecom/spacex-zapustit-suputnikovij-zvjazok-starlink-dlja-smartfoniv-962254.html>

### Tyunder I.S. Problems of using STARLINK in Ukraine under the conditions of marital state

The article examines the problems and prospects of the STARLINK satellite communication project, as well as the application of STARLINK in Ukraine.

*Satellite Internet - a method of providing access to the Internet using satellite communication technologies.*

*Global coverage of the Earth with inexpensive high-speed Internet access will create new opportunities in the fields of education, transport, tourism, and construction. Elon Musk's company SpaceX has become one of the*

most influential in the field of space technologies and discoveries. The most successful project of Mask's company - Starlink - received wide recognition and opened up new opportunities for providing access to high-speed Internet, in particular, in the conditions of hostilities in Ukraine. It is widely used by the Armed Forces of Ukraine, de-occupied communities, journalists, and not only. [1]

SpaceX opened pre-orders for Starlink satellite internet in February 2021 for the first countries - the USA, Canada and Great Britain. For Ukraine, access to it was planned for 2022. However, the Russian attack significantly accelerated this process.

It is noted that with the expected growth of the Starlink network, which will consist of 42,000 satellites, it will become crowded in orbit very quickly. This will pose a threat to other satellites and also interfere with astronomical observations from the Earth.

Already, Starlink satellites are responsible for most of the incidents with the threat of collision with other satellites.

Also a problem is the relatively short life of the Starlink satellites, which last only about five years.

Attention was drawn to the fact that Starlink has difficulties with maintenance and service, the inability to change the owner's account data, which is regularly

reported not only by Ukrainians, but also by users from other countries. Soldiers of the Ukrainian Armed Forces tell "The Week" about other difficulties in the operation of the terminals, including limited mobility (possibility of using them not at the first connection point). This often led to the fact that many Starlink terminals, in particular those received by the Ukrainian Defense Forces, turned into scrap: they cannot be used for their intended purpose in the right place. Apart from the problems of the STARLINK project, the implementation of the Starlink network in Ukraine is expected to be a big step forward in bridging the digital divide and bringing the country closer to achieving full Internet access. This project promises to be a boon for the people of Ukraine and will serve as an example of how technology improves life.

**Keywords:** Internet, satellite communication, SpaceX, STARLINK, Ukraine, Armed Forces of Ukraine.

**Тюндер І.С.** – старший викладач кафедри «Електронних апаратів» Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, e-mail: [irina.tunder@gmail.com](mailto:irina.tunder@gmail.com)

Стаття подана 15.10.2023.