

UDC 581.132-021.58]502/504

**Oksana Tykhenko**, D.Sc. of Engineering, Prof.

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6459-6497> **e-mail:** okstih@ua.fm

**Karina Deineka**, student

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-4093-0222> **e-mail:** deynekakarina@ukr.net

National Aviation University, Kyiv, Ukraine

## ENVIRONMENTAL ASPECTS OF USING ARTIFICIAL PHOTOSYNTHESIS TECHNOLOGY FOR ENVIRONMENTAL DECARBONIZATION

**Abstract.** The increasing levels of carbon dioxide ( $CO_2$ ) in the atmosphere have been recognized as a major contributor to global climate change. As a result, there is a pressing need to develop sustainable and eco-friendly methods for mitigating  $CO_2$  emissions.  $CO_2$  recycling has emerged as a promising solution, aiming to convert  $CO_2$  into valuable products while reducing its impact on the environment. This work uses the  $CO_2$  recycling approach, which involves the conversion of  $CO_2$  emissions into useful organic compounds. An experiment with artificial photosynthesis is carried out with the help of a special installation, where  $CO_2$  undergoes photochemical reactions that contribute to the formation of organic compounds. Photocatalytic conversion of  $CO_2$  is environmentally friendly as it uses light energy and renewable raw materials to produce valuable chemicals without producing harmful by-products or waste. It has been established that  $TiO_2$  in the form of anatase and rutile is the most common  $CO_2$  photocatalyst. As a result of the experiment, the main output products were methanol, acetate aldehyde and acetone. The use of ultraviolet radiation and an electric field significantly affected the synthesis of organic substances and their quantity. It can be used in various industries such as fuel, chemical and pharmaceutical industries. In particular, methanol, acetate aldehyde and acetone are promising substances for the use and production of biofuels.

**Key words:** recycling; carbon dioxide; climate change; artificial photosynthesis; processing of  $CO_2$ ; atmospheric air; organic substances.

**О.М. Тихенко, К.С. Дейнека**

Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

## ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ШТУЧНОГО ФОТОСИНТЕЗУ ДЛЯ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ДОВКІЛЛЯ

**Анотація.** Підвищення рівня вуглекислого газу ( $CO_2$ ) в атмосфері визнано головним фактором глобальної зміни клімату. Як наслідок, існує нагальна потреба у розробці стійких та екологічно чистих методів зменшення викидів  $CO_2$ . Переробка  $CO_2$  стала перспективним рішенням для перетворення  $CO_2$  на цінні продукти, одночасно зменшуючи його вплив на навколишнє середовище. У цій роботі використовується підхід рециклінгу  $CO_2$ , який передбачає перетворення викидів  $CO_2$  в корисні органічні сполуки. Експеримент з штучним фотосинтезом здійснюється за допомогою спеціальної установки, де  $CO_2$  піддається фотохімічним реакціям, що сприяють утворенню органічних сполук. Фотокаталітичне перетворення  $CO_2$  є екологічним, оскільки використовується світлова енергія та відновлювана сировина для виробництва

цінних хімічних речовин без утворення шкідливих побічних продуктів або відходів. Встановлено, що  $TiO_2$  у формі анатазу та рутилу є найпоширенішим фотокаталізатором  $CO_2$ . В результаті проведення експерименту основними продуктами виходу були метанол, ацетат альдегід та ацетон. Використання ультрафіолетового випромінювання та електричного поля значно вплинуло на синтез органічних речовин та їх кількість. В подальшому вони можуть бути використані в різних галузях, таких як паливна, хімічна та фармацевтична промисловість. Зокрема, метанол, ацетат альдегід та ацетон є перспективними речовинами для використання та виробництва біопалива.

**Ключові слова:** рециклінг; вуглекислий газ; зміна клімату; штучний фотосинтез; переробка  $CO_2$ ; атмосферне повітря; органічні речовини.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.3.39-48>

## Вступ

Зі зростанням рівня вуглекислого газу ( $CO_2$ ) в атмосфері, зміна клімату стала однією з найважливіших проблем, які ставлять під загрозу існування нашої планети. Швидкісний розвиток промисловості, споживчого суспільства та використання викопних палив призвели до значного збільшення викидів  $CO_2$ . У зв'язку з цим, на сьогоднішній день нагальною стала потреба у розробці стійких та екологічно чистих методів зменшення викидів  $CO_2$ . Один з таких методів – рециклінг  $CO_2$ . За рахунок застосування цього процесу можна не лише зменшити вплив  $CO_2$  на клімат Землі, але й перетворити його в цінні ресурси.

Фотокаталітична конверсія  $CO_2$  в органічні речовини є важливою та актуальною з кількох причин:

1)  $CO_2$  є головним фактором зміни клімату, і його перетворення на хімічні речовини за допомогою фотокаталізу може допомогти зменшити кількість  $CO_2$  в атмосфері та пом'якшити наслідки зміни клімату;

2) виробництво органічних речовин з  $CO_2$  може зменшити залежність від викопного палива та інших невідновлюваних ресурсів, що робить його сталим підходом до хімічного синтезу;

3) фотокаталітичне перетворення  $CO_2$  є екологічним, оскільки використовується світлова енергія та відновлювана сировина для виробництва цінних хімічних речовин без утворення шкідливих побічних продуктів або відходів;

4) перетворення  $CO_2$  на органічні речовини може створити нові економічні можливості та джерела доходу при зменшенні використання вуглецю;

5) вивчення фотокаталітичного перетворення  $CO_2$  вимагає розробки нових матеріалів, каталізаторів і реакційних систем, що може призвести до наукового прогресу в галузі матеріалознавства та каталізу.

**Мета роботи** полягає у дослідженні екологічних переваг рециклінгу  $CO_2$  для декарбонізації та забезпечення екологічно стійкого розвитку довкілля.

## Аналіз літератури

Декарбонізація – це зменшення викидів  $CO_2$  за рахунок використання джерел енергії з низьким вмістом вуглецю, досягнення меншого викиду парникових газів в атмосферу.

Основними прикладами методів декарбонізації є:

1. ініціатива обмеження видобутку корисних копалин, основні положення якої викладені в [1] та базуються на розрахунках міжнародних експертів [2], які вважають, що для уповільнення глобального потепління необхідно до 2030 року скоротити видобуток вугілля (61%), нафти (36%) і природного газу (32%);

2. відмова від двигунів внутрішнього згорання. Зменшення перевезень транспортних засобів на основі двигунів внутрішнього згорання підтримується членами Альянсу з декарбонізації транспорту [3] та Альянсу з нульовими викидами транспортних засобів [4], які об'єднують понад 20 країн. Згідно з аналізом відкритих даних [5], до 2025 року частка продажів нових автомобілів з двигунами внутрішнього згорання знизиться до 23%. Пропорційно до цього знизиться і попит на продукти нафтопереробки;

3. технологія прямого захоплення повітря (Direct-Air-Capture, DAC), що заснована на вилученні CO<sub>2</sub> з атмосфери за допомогою гігантських пирососів. Фільтруючий матеріал містить аміни – спеціальні хімічні речовини, які вловлюють вуглекислий газ [6];

4. штучний фотосинтез – це процес використання штучних систем для виробництва енергії з використанням сонячного світла. Штучний фотосинтез відбувається подібно до природного фотосинтезу в рослинах [7]. Технологія штучного фотосинтезу для рециклінгу CO<sub>2</sub> у органічні сполуки має потенціал для зменшення викидів парникових газів та скорочення використання викопних палив. Однак, перед впровадженням у промисловий процес необхідно вдосконалення каталізаторів, оптимізація енергетичної ефективності та розв'язання практичних технічних проблем.

## Методика проведення дослідження

У лабораторних умовах проведений експеримент по рециклінгу. Для проведення досліджень використовувалися два зразки фотокаталізатора TiO<sub>2</sub> у вигляді рутилу та анатазу.

Питома поверхня досліджуваних зразків оцінювалася за вимірюваннями адсорбції/десорбції азоту при 196 °C за допомогою приладу Sorptomatic 1900 (CarloErba, Мілан, Італія). Перед вимірюваннями зразки порошку дегазувалися у вакуумі при 300 °C.

Спектри дифузного відбиття зразків порошку вимірювалися за допомогою спектрофотометра Cary 5000 UV–VIS–NIR з інтегруючою сферою (Agilent, Санта-Клара, Каліфорнія, США) в діапазоні довжин хвиль 200–800 нм. Спектри відбиття фіксувалися зі спектральною роздільністю 1 нм.

Морфологія поверхні зразків досліджувалася за допомогою скануючого електронного мікроскопа HITACHI (HitachiHigh-Tech, Tokyo, Японія), оснащеного енергодисперсійним спектрометром EDS (Thermo Noran, Worona Road Madison, WI, USA) .

Фотокаталітичні вимірювання проводилися в безперервному проточному реакторі (рис. 1), що складається з двох частин: нижнього циліндра, який був обладнаний нагрівальним елементом і системою охолодження, а також верхнього циліндра, всередині якого поміщався фотокаталізатор і куди вводили реакційну суміш.

Верхня частина була закрита кварцовим склом і ущільнена хімічно інертними прокладками. Як джерело електромагнітного випромінювання

(365 нм і 465 нм) використовувалася діодна матриця. Площа поверхні фотокатализатора, піддана електромагнітному випромінюванню, становила 10,18 см<sup>2</sup>. Умови процесу були наступними: температура реактора 30 °С, реакційна суміш – 5% об. Н<sub>2</sub>О – 95% об. СО<sub>2</sub>; загальна витрата газу – 0,8 мл/хв, маса фотокатализатора – 10 мг.

Вологий СО<sub>2</sub> був отриманий пропусканням сухого СО<sub>2</sub> через термостатований барботер, наповнений фільтрованою водою. Температура барботера встановлювалася таким чином, щоб досягти 5% води в газі. Додатково відбувався підігрів газопроводу, щоб уникнути конденсації води. Перші вимірювання проводилися щонайменше через 2 години на потоці. Аналіз продуктів реакції проводився за допомогою on-line газового хроматографа, оснащеного полум'яно-іонізаційним детектором і капілярною колонкою HP PLOT/Q. Були використані такі умови аналізу: газ-носії – гелій, температура детектора 220 °С, температура інжектора 120 °С.

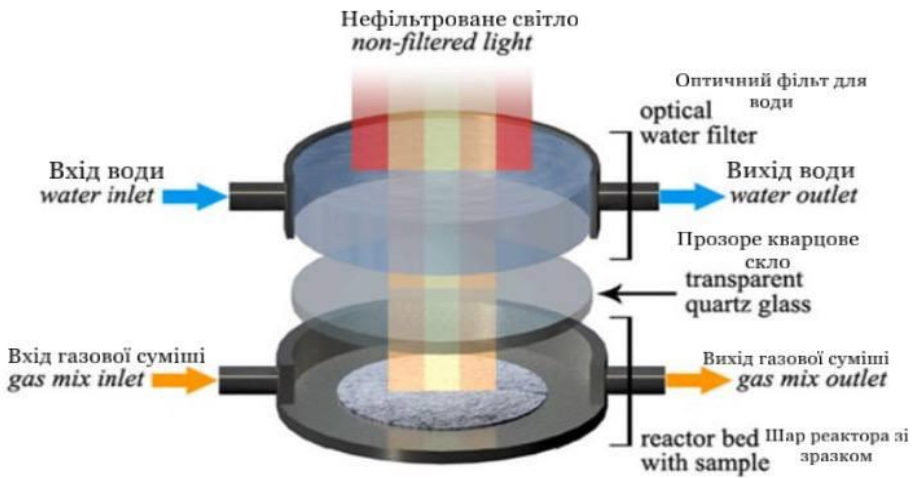


Рис. 1. Схематичне зображення фотокаталітичного реактора

## Результати дослідження

Для експерименту обрано два зразки TiO<sub>2</sub>. Перший зразок був оброблений при 500 °С, інший – 700 °С. Після такої термічної обробки змінюється питома поверхня (рис. 2). Перший зразок складається з 87,8% анатазу і 12,8% рутилу, другий – на 100% складається з рутилу.

Було проведено дослідження з рециклінгу СО<sub>2</sub> за допомогою штучного фотосинтезу.

Штучний фотосинтез використовує фотокатализатори – речовини, які можуть поглинати світлову енергію і використовувати її для спонукання хімічних реакцій. Катализатором в даній реакції виступає TiO<sub>2</sub>.

У процесі фотокаталітичної реакції, під дією світла, фотокатализатори стають активними і здатними ініціювати хімічні перетворення. Вони можуть взаємодіяти з реакційними речовинами (наприклад, органічними сполуками) і сприяти формуванню нових зв'язків або розриву існуючих. Цей процес може привести до синтезу складних органічних сполук.

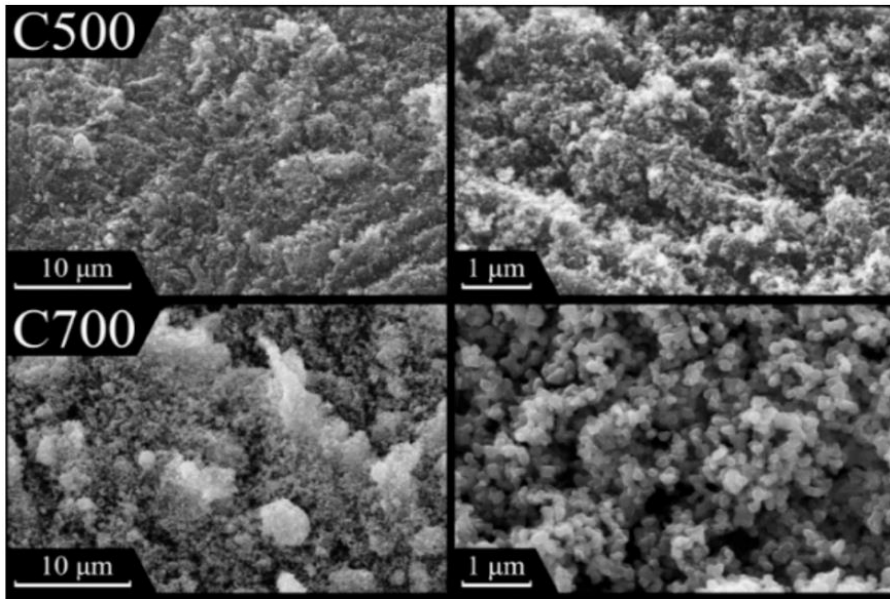


Рис. 2. Вигляд зразків  $\text{TiO}_2$  після термічної обробки

Мета першого експерименту – перевірити, чи відбудеться синтез речовин без використання ультрафіолетового випромінювання.

Результати проведеного дослідження свідчать, що синтез відбувався, найбільше утворювалося ацетат альдегіду, метанол і ацетон утворювалися в дуже малій кількості і лише за один проміжок часу порівняно з ацетат альдегідом (рис. 3).

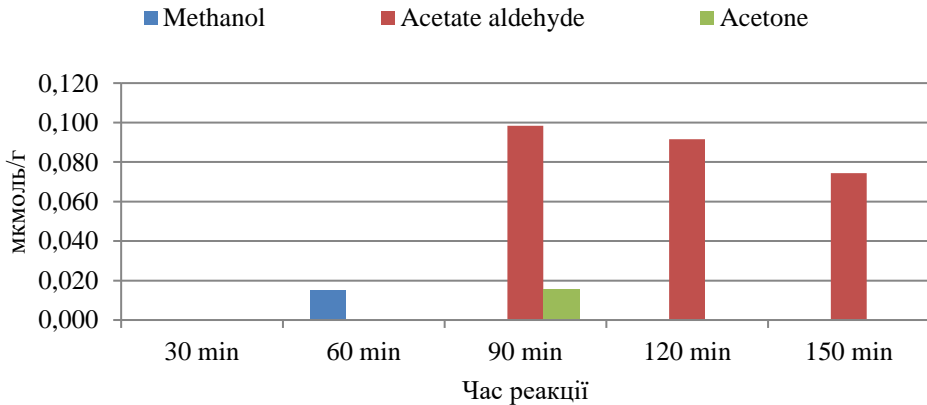


Рис. 3. Результати утворення кількості мікромолей органічних речовин, що утворилися на 1 грам каталізатора за 1 годину без електромагнітного випромінювання

Експеримент з анатазом під дією ультрафіолету, потужність якого становила 50% без електричного поля, показав, що кількість ацетат альдегіду з часом збільшується. Метанол почав утворюватися лише через 90 хвилин. Ацетон утворився з самого початку, в невеликій кількості (рис. 4).

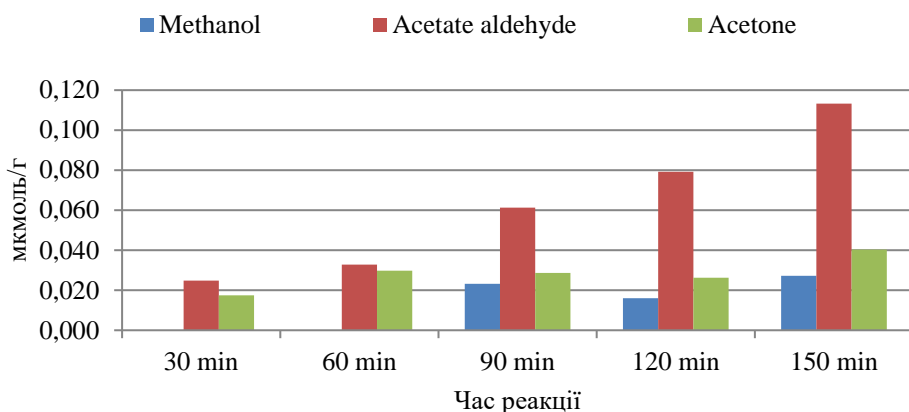


Рис. 4. Результати утворення кількості мікромолей органічних речовин, що утворилися на 1 грам каталізатора за 1 годину за допомогою УФ (інтенсивність 50%) випромінювання без електричного поля

При збільшенні інтенсивності УФ до 100% кількість усіх продуктів зростає в півтора рази, метанол почав утворюватися знову з 90 хв. Отже, інтенсивність УФ впливає на вихід продукції (рис. 5).

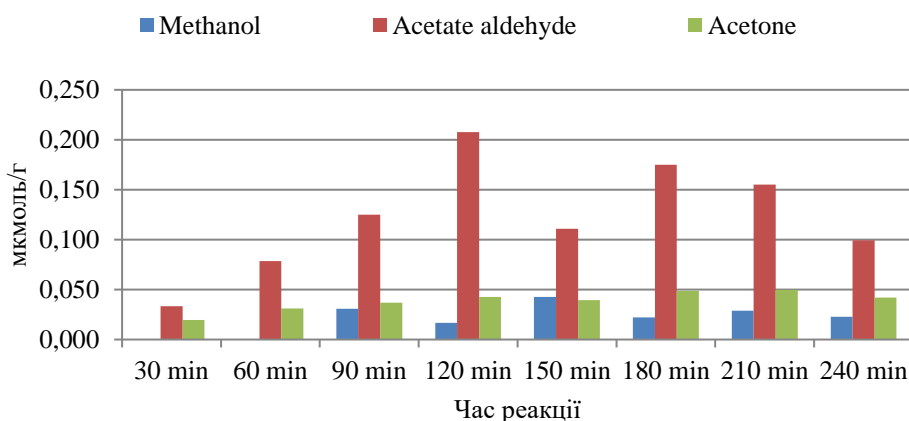


Рис. 5. Результати утворення кількості мікромолей органічних речовин, що утворилися на 1 грам каталізатора за 1 годину з використанням УФ (інтенсивність 100%) випромінювання без електричного поля

При використанні 100% інтенсивності УФ-випромінювання і додаванні електричного поля (рис. 6) відразу видно, що реакція пройшла краще, ніж в попередньому варіанті. Всі продукти почали утворюватися з початку експерименту. З часом всі три продукти почали знижуватися через дезактивацію каталізатора.

Порівнюючи синтез речовини за допомогою ультрафіолетового світла та електричного поля, можна чітко простежити, що кількість речовини значно збільшилася порівняно з тим, коли електричне поле було відсутнє.

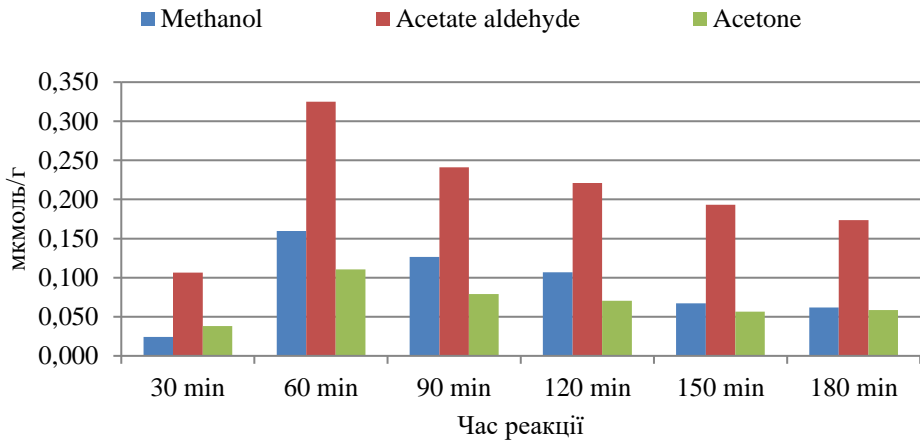


Рис. 6. Результати утворення кількості мікромолей органічних речовин, що утворилися на 1 грам каталізатора за 1 годину з використанням УФ (100% інтенсивності) випромінювання з електричним полем

Експеримент з рутилом при використанні 100% ультрафіолетового випромінювання, без електричного поля (рис. 7) показав, що найбільше утворюється ацетат альдегіду, ацетон починає утворюватися з 60 хвилини, а метанол – з 120 хвилин у найменшій кількості.

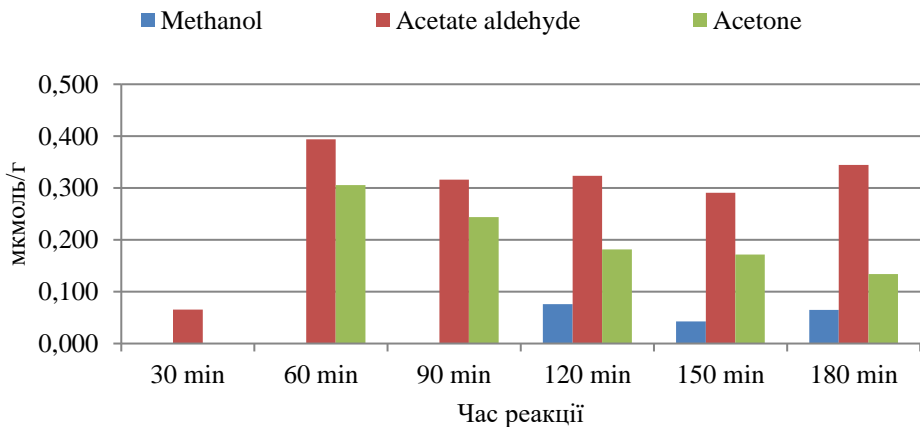


Рис. 7. Результати утворення кількості мікромолей органічних речовин, що утворилися на 1 грам каталізатора за 1 годину з використанням УФ (інтенсивність 100%) випромінювання, без електричного поля

При додаванні електричного поля (рис. 8) ацетон і ацетат альдегід почали утворюватися з самого початку експерименту, метанол – з 90 хвилини.

Дослідження з додаванням рутилу показали, що більша кількість ацетатного альдегіду утворюється за допомогою ультрафіолетового випромінювання та електричного поля. Більша кількість метанолу і ацетону утворюється без використання електричного поля.

Порівнюючи однакові умови експерименту, використання рутилу виявилось більш ефективним по відношенню до аналізу.

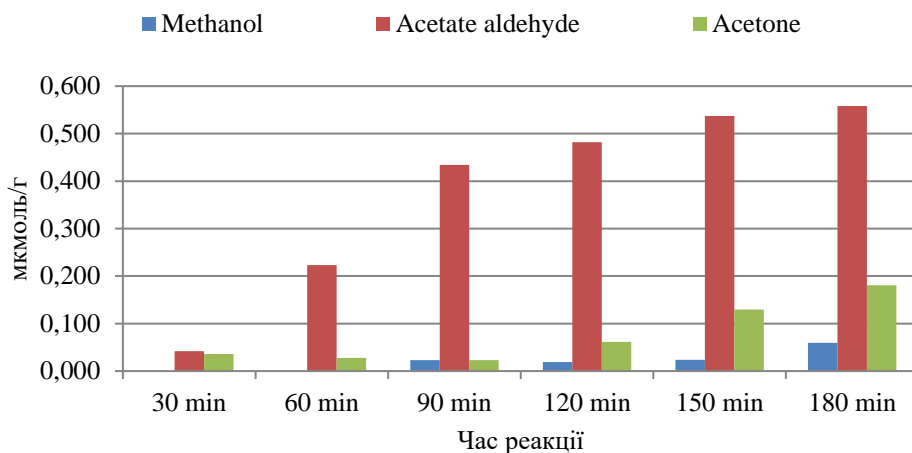


Рис. 8. Результати утворення кількості мікромолей органічних речовин, що утворилися на 1 грам каталізатора за 1 годину з використанням УФ (100% інтенсивності) випромінювання з електричним полем

## Висновки

Фотокаталітичне перетворення  $\text{CO}_2$  з утворенням органічних речовин є важливим, оскільки  $\text{CO}_2$  є основним парниковим газом, надлишок якого в атмосфері призводить до зміни клімату. Перетворюючи  $\text{CO}_2$  на інші хімічні речовини, можна пом'якшити його вплив, зменшивши його концентрацію в атмосфері.

В результаті проведення експерименту основними продуктами виходу були метанол, ацетат альдегід та ацетон. Використання ультрафіолетового випромінювання та електричного поля значно вплинуло на синтез органічних речовин та їх кількість.

Метанол утворювався в найбільшій кількості зі зразком анатазу, із середнім виходом 0,040 мкмоль/год. У найбільшій кількості ацетат альдегід утворювався зі зразком рутилу, середній вихід становив 0,334 мкмоль/год. Ацетон також утворювався в найбільшій кількості зі зразком рутилу, із середнім виходом 0,124 мкмоль/год.

За рахунок фотокаталітичного перетворення  $\text{CO}_2$  можливе виробництво відновлюваного палива та хімікатів. Встановлено, що  $\text{TiO}_2$  у формі анатазу та рутилу є найпоширенішим фотокаталізатором  $\text{CO}_2$ . В обох випадках фотокаталітичне перетворення  $\text{CO}_2$  передбачає поглинання світлової енергії для створення електронно-діркових пар, які потім можуть реагувати з  $\text{CO}_2$  з утворенням різних продуктів.

Рециклінг  $\text{CO}_2$  за допомогою штучного фотосинтезу має кілька екологічних аспектів, які є перспективними для декарбонізації довкілля:

- зменшення викидів парникових газів;
- використання відновлюваної енергії;
- зменшення залежності від викопних ресурсів;
- зниження забруднення довкілля;
- закриття глобального вуглецевого циклу.



Утворені речовини – метанол, ацетат альдегід та ацетон є перспективними речовинами для використання та виробництва біопалива. Метанол може використовуватись як пряме паливо для спеціалізованих двигунів або як сировина для виробництва інших паливних продуктів, таких як диметил ефір (DME) або водень. Ацетат альдегід може бути перетворений в бутанол, який може служити як заміник бензину. Бутанол має високий вміст енергії і може бути використаний у стандартних двигунах без значних модифікацій. Ацетон є перспективною речовиною для виробництва пропанолу, який може бути використаний як альтернатива бензину або додаткове паливо для змішування з бензином.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. The Lofoten Declaration: A Global Call for Climate Leadership. The Lofoten Declaration. URL: <http://www.lofotendeclaration.org/> (дата звернення: 18.06.2023).
2. The Production Gap Report: 2020 Special Report / SEI, IISD, ODI, E3G, UNEP, December 2020. URL: <https://productiongap.org/> (дата звернення: 18.06.2023).
3. Transport Decarbonisation Alliance. URL: <http://tda-mobility.org/> (дата звернення: 18.06.2023).
4. Zev Alliance. Accelerating the Adoption of Zero-Emission Vehicles. URL: <http://www.zevalliance.org/> (дата звернення: 18.06.2023).
5. Growing momentum: Global overview of government targets for phasing out sales of new internal combustion engine vehicles. International Council on Clean Transportation. URL: <https://theicct.org/blog/staff/global-ice-phaseout-nov2020> (дата звернення: 18.06.2023).
6. Журнал «Економіка та держава» – наукове фахове видання України з питань економіки. URL: [http://www.economy.in.ua/pdf/1\\_2021/28.pdf](http://www.economy.in.ua/pdf/1_2021/28.pdf) (дата звернення: 18.06.2023).
7. Визначення фотосинтезу, етапи, рівняння, процес і діаграма. *Microbiology Note – Online Biology Notes*. URL: <https://microbiologynote.com/uk/photosynthesis/> (дата звернення: 18.06.2023).

*Стаття надійшла до редакції 13.06.2023 і прийнята до друку після рецензування 11.09.2023*

## REFERENCES

1. The Lofoten Declaration: A Global Call for Climate Leadership. The Lofoten Declaration. Retrieved June, 18, 2023 from <http://www.lofotendeclaration.org/>
2. The Production Gap Report: 2020 Special Report. SEI, IISD, ODI, E3G, UNEP, December 2020. Retrieved June, 18, 2023 from <https://productiongap.org/>
3. Transport Decarbonisation Alliance. Retrieved June, 18, 2023 from <http://tda-mobility.org/>
4. Zev Alliance. Accelerating the Adoption of Zero-Emission Vehicles. Retrieved June, 18, 2023 from <http://www.zevalliance.org/>
5. Growing momentum: Global overview of government targets for phasing out sales of new internal combustion engine vehicles. International Council on Clean Transportation. Retrieved June, 18, 2023 from <https://theicct.org/blog/staff/global-ice-phaseout-nov2020>
6. Journal «Economy and the State» – a scientific publication of Ukraine on economic issues. Retrieved June, 18, 2023 from [http://www.economy.in.ua/pdf/1\\_2021/28.pdf](http://www.economy.in.ua/pdf/1_2021/28.pdf)
7. Definition of photosynthesis, stages, equations, process and diagram. *Microbiology Notes – Online Biology Notes*. Retrieved June, 18, 2023 from <https://microbiologynote.com/uk/photosynthesis/>

*The article was received 13.06.2023 and was accepted after revision 11.09.2023*

**Тихенко Оксана Миколаївна**

д.т.н., проф., професор кафедри екології Національного авіаційного університету

**Адреса робоча:** 03058 Україна, м. Київ, пр-т Любомира Гузара, 1

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6459-6497> **e-mail:** [okstih@ua.fm](mailto:okstih@ua.fm)

**Дейнека Каріна Сергіївна**

здобувачка вищої освіти, кафедра екології Національного авіаційного університету

**Адреса робоча:** 03058 Україна, м. Київ, пр-т Любомира Гузара, 1

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-4093-0222> **e-mail:** [deynekakarina@ukr.net](mailto:deynekakarina@ukr.net)