УДК 662.756.3, 544.77, 544.723.21 https://doi.org/10.7124/FEEO.v39.1842

БЛЮМ Е. Я.[1]✉
БЛЮМ Р. Я.[2]
БИЧКО І. Б.[1]

[1] *Інститут фізичної хімії ім. Л. В. Писаржевського НАН України, Україна, 03028, м. Київ, просп. Науки, 31*
[2] *Інститут харчової біотехнології та геноміки НАН України, Україна, 04123, м. Київ, вул. Байди-Вишневецького, 2А*
✉ *blyum.evelina@gmail.com*

ОТРИМАННЯ ГЛІЦЕРОЛ КАРБОНАТУ ШЛЯХОМ ГЕТЕРОГЕННОГО КАТАЛІЗУ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОЇ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ ВИРОБНИЦТВА БІОДИЗЕЛЮ З РОСЛИННИХ ОЛІЙ

Мета. Встановлення можливості використання гетерогенних каталізаторів різної природи (на основі карбону (оксид графену), полімеру (PEO/PEI) та оксидних систем (Fe_2O_3/Al_2O_3, Co_3O_4/Al_2O_3 та NiO/Al_2O_3)) у каталітичному перетворенні гліцеролу з карбон(IV) оксидом для ефективного використання побічних продуктів отримання біодизелю з рослинних олій. ***Методи.*** Синтез гліцерол карбонату шляхом гетерогенного каталізу, газова хроматографія, масспектрометрія. ***Результати.*** Показано, що взаємодія гліцеролу з карбон(IV) оксидом у присутності гетерогенних каталізаторів можлива лише за умов підвищених значень температури і тиску та за присутності дегідратуючого агенту (ацетонітрилу). Встановлено, що каталітична активність суттєво залежить від хімічної природи та стабільності матеріалів, при цьому найбільшу конверсію гліцеролу (21,9%) забезпечує каталізатор NiO/Al_2O_3, а найвищий вихід карбонатних продуктів (2,34%) досягається при використанні полімерного каталізатора PEO/PEI. ***Висновки.*** Отримані результати свідчать про перспективність використання гетерогенних каталізаторів у процесах утилізації гліцеролу та CO_2 і можуть бути основою для подальшої оптимізації складу каталізаторів і умов проведення процесу з метою підвищення селективності та виходу гліцерол карбонату як цінної речовини.

Ключові слова: гліцерол, вуглекислий газ, гліцерол карбонат, гетерогенний каталіз, зелена хімія.

На сьогодні глобальні кліматичні зміни, спричинені викидами парникових газів, вважаються однією з найважливіших світових проблем. У зв'язку з цим питання заміщення традиційний палив – продуктів нафтопереробки, стає надзвичайно актуальним, у тому числі і для України (Blume et al., 2022; Stamenković et al., 2021; Ratanapariyanuch et al., 2013). Незважаючи на це, найпоширенішим джерелом енергії у сучасному світі залишаються різні види викопних палив, використання яких супроводжується утворенням значних обсягів вуглекислого газу (CO_2) – одного з ключових парникових газів, котрі є причиною посилення глобальних кліматичних змін. Попри інтенсивний розвиток відновлюваної енергетики у найближчі роки прогнозується подальше збільшення споживання викопних видів палива, а, отже, і подальше зростання рівня CO_2 в атмосфері (Lukato et al., 2021).

З огляду на необхідність утилізації CO_2 значна увага приділяється реакціям, у яких карбон(IV) оксид поєднується з доступними та низьковартісними реагентами для одержання речовин з високою доданою вартістю. Протягом останніх десятиліть запропоновано низку каталітичних підходів до хімічного використання CO_2, зокрема, реакції відновлення органічними сполуками, реакції приєднання та кополімеризації CO_2 з епоксидами (Meylan et al., 2015; Whang et al., 2019). Втім, лише небагато каталітичних систем продемонстрували продуктивність, близьку до тієї, що потрібна для масштабного промислового застосування таких технологій

© 2026 Блюм Е. Я., Блюм Р. Я., Бичко І. Б. This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

(Whang et al., 2019), однією з яких є карбоксилювання гліцеролу (Lukato et al., 2021).

Гліцерол є основним побічним продуктом виробництва біодизеля. Основна частина дизельного біопалива виробляється з 4-х найпоширеніших у світі олійних культур (олійної пальми, сої, соняшника та ріпаку), а також із використанням ряду малопоширених, однак, перспективних видів (рижій посівний, талабан, абіссинська гірчиця) (Ratanapariyanuch et al., 2013). На сьогодні переважна більшість способів отримання біодизелю з рослинних олій базуються на різних варіантах реакції трансестерифікації, котра дозволяє отримувати метилові або етилові естери жирних кислот безпосередньо з триацилгліцеридів (Blume et al., 2022). Зазвичай для отримання біодизелю застосовують лужну каталітичну трансестерифікацію або, рідше, переетерифікацію за надкритичних умов (Stamenković et al., 2021).

Оскільки прогнозується, що обсяг відходів сирого гліцеролу досягне 2,7 млн т/рік в наступні декади, існує нагальна потреба перетворення гліцеролу на хімічні речовини значного комерційного попиту (Ayoub and Abdullah, 2012). Враховуючи, що очищення сирого гліцеролу є складним та енергоємним процесом, також бажаною є розробка ефективних процесів для прямого перетворення сирого гліцеролу на цінні продукти з високою доданою вартістю. Наразі значні зусилля зосереджені на використанні CO_2 та гліцеролу як сировини для виробництва цінних хімічних продуктів. Біодизельна промисловість виробляє великі обсяги гліцеролу як побічного продукту, створюючи проблеми його утилізації, тоді як CO_2 є парниковим газом. Гліцерол карбонат (ГК) є одним з найцінніших продуктів утилізації біогліцеролу (Takagaki et al., 2010; Checa et al., 2020). Пряме перетворення цих відходів у ГК (гліцерол карбонат) є привабливим і сталим підходом, що пропонує екологічні та економічні переваги.

Пряме карбоксилювання гліцеролу з CO_2 є термодинамічно обмеженим процесом. Для зміщення рівноваги в бік ГК застосовують дегідратуючі речовини, які видаляють утворену воду. При цьому кислотні агенти часто сприяють утворенню побічних продуктів, таких як моно-, діа- та триацетини, тоді як основні агенти зазвичай покращують селективність до ГК (Lukato et al., 2021). Гетерогенні каталізатори забезпечують легке відновлення та повторне використання, конкурентоспроможні виходи ГК та спрощене очищення продуктів. Незважаючи на прогрес, гетерогенні системи все ще потребують вдосконалення. Раціональне поєднання каталізаторів і дегідратуючих агентів є ключем до підвищення виходу ГК та селективності процесу, відкриваючи шлях до сталого промислового виробництва (Lukato et al., 2021). Саме тому метою нашого дослідження було встановити вплив умов проведення процесу карбонізації на селективність продуктів перетворення та на вихід гліцерол карбонату, визначити умови проведення процесу взаємодії гліцеролу та CO_2, а також встановити каталітичні властивості твердих каталізаторів різного складу та визначити перспективний напрям подальших досліджень.

Матеріали і методи

Тестування каталітичних властивостей матеріалів проводили в герметичному сталевому реакторі високого тиску об’ємом 150 мл, оснащеному термостатом, манометром, термодатчиком та магнітною мішалкою. Процес проводили у присутності дегідратуючого реагенту (задля уникнення перебігу зворотної реакції) – ацетонітрилу, який в ході реакції взаємодіє з водою з утворенням ацетаміду та оцтової кислоти. При проведенні досліду до реактора вносили гліцерол (5 мл), ацетонітрил (5 мл) і каталізатор (0.05 г). В роботі використовували попередньо приготовлені каталізатори (PEO/PEI (полімер на основі поліетиленоксиду та поліетиленіміну) та ОГр (оксид графену)), так і каталізатори, які було синтезовано самостійно (Fe_2O_3/Al_2O_3, Co_3O_4/Al_2O_3 та NiO/Al_2O_3). PEO/PEI та ОГр були одержані за методиками (Hengsbach et al., 2025; Bychko et al., 2022) в лабораторії Інституту фізичної хімії ім. Л. В. Писаржевського НАН України. Як внутрішній стандарт додавали 100 мкл додекану. Реактор герметизували, тричі продували CO_2 і далі нагнітали тиск 4 МПа. Реакцію проводили за 150 °С протягом 24 год з інтенсивним перемішуванням (600 об/хв). Після завершення реакції реактор охолоджували до кімнатної температури, повільно стравлювали тиск. Потім реакційну суміш центрифугували для відділення каталізатору та декантували. До одержаної суміші додавали 20 мл ацетонітрилу та аналізували отриманий розчин.

Аналіз рідкої фази здійснювали за допомогою газового хроматографа з мас-спектрометричним детектором (GC–MS) на приладі Agilent Technologies 6890N Network GC System (США) та Agilent Technologies 5975 Series MSD (США) з програмним забезпеченням *MassHunter* та *MSD*

ChemStation. Використовували хроматографічну колонку HP5-MS (Agilent Technologies, США). Температура інжектора становила 250 °C, температура термостата колонки витримувалась за температури 35 °C протягом 3 хв, після чого лінійно підіймалась від 35 до 250 °C зі швидкістю 20 °C/хв та витримувалась за температури 250 °C 0,5 хв. Катод мас-спектрометричного детектору вмикали після 3 хв з початку аналізу (solvent delay), відповідно, ацетонітил у хроматограмі не фіксувався. Об'єм проби становив 0,2 мкл. Ідентифікацію сполук проводили шляхом порівняння одержаних мас-спектрів з мас-спектрами бази даних NIST (National Institute of Standards and Technology «https://webbook.nist.gov/chemistry/»). Конверсію, селективність і вихід обчислювали за стандартними формулами (Bychko et al., 2022) на основі даних GC–MS з урахуванням відомої концентрації додекану:

$$\text{Конверсія (\%)} = \frac{((\text{початковий моль гліцеролу}) - (\text{моль неперетвореного гліцеролу}))}{\text{початковий моль гліцеролу}} \times 100\%;$$

$$\text{Конверсія (\%)} = \frac{\text{моль утвореного етилен та гліцерол карбонатів}}{\text{моль перетвореного гліцеролу}} \times 100\%;$$

$$\text{Вихід (\%)} = \text{конверсія} \times \text{селективність} \times 0{,}01$$

Результати та обговорення

Результати аналізу реакційних сумішей після проведення каталітичних досліджень свідчать про те, що в умовах реакції оксид графену (ОГр) є нестабільним. Перетворення підтверджується зміною забарвлення каталізатору з коричневого кольору на чорний, що вказує на утворення відновленої форми оксиду графену. Така зміна є типовою для оксидів графітів та графенів, які за температур вище 100 ºС диспропорціонують з утворенням відновленої форми. Полімерний матеріал PEO/PEI в умовах проведення реакції втрачає цілісність та фрагментується, однак його розчинення не спостерігається. Змішані оксидні системи є стабільними. На рисунку 1 представлена типова хроматограма продуктів взаємодії гліцеролу та CO_2 з використанням гетерогенного каталізатору. На представленій хроматограмі фіксується 6 піків, які відносяться до різних компонентів суміші. Як наслідок, компонент з найменшим часом утримання характеризується асиметричним хроматографічним піком. Зокрема, це свідчить про те, що такий компонент є полярною, або сильнополярною речовиною.

Ідентифікація продуктів реакції за мас-спектрами показала, що компонентами є, в порядку збільшення часу утримання, 1-аміноетанол, 1-моноацетин, 2-моноацетин, додекан та діацетин. Шостий компонент є сумішшю етилен карбонату та ГК, розділення котрих не досягається за умов використання хроматографічної колонки HP-5. Компонент з найменшим часом утримання, який ідентифіковано як 1-аміноетанол, ймовірно, є сумішшю різних компонентів, таких як ацетамід та оцтова кислота, розділення яких не було досягнуто, що частково підтверджується тим, що 1-аміноетанол є нестабільною сполукою, яка не існує в чистій формі. Ідентифікація такої сполуки з наведеним мас-спектром зумовлена наявністю найбільш інтенсивного молекулярного йону з масою 61, що відповідає молекулярній масі 1-аміноетанолу та йону 44, що відповідає осколковому йону 1-аміноетанолу з відщепленою ОН групою.

Також, нами було проведено хроматографічний аналіз продуктів взаємодії гліцеролу та CO_2 як для системи у відсутності каталізатору, так і з використанням гетерогенних каталізаторів. Усі 6 продуктів каталітичної реакції фіксуються тільки у випадку використання каталізаторів PEO/PEI та NiO/Al_2O_3 (рис.). У випадку перетворення за умов відсутності каталізатора фіксуються 1-аміноетанол, моноацетин та додекан. Аналогічний набір компонентів спостерігається і у випадку використання каталізаторів Fe_2O_3/Al_2O_3 та Co_3O_4/Al_2O_3. У випадку використання ОГр утворення моноацетину не фіксується, однак у реакційній суміші присутній додатковий невизначений компонент, час утримання якого співпадає з часом виходу 1-аміноетанолу. В такому випадку виділити окремий мас-спектр даного компоненту не вдається. Його утворення, ймовірно, є наслідком процесу диспропорціонування ОГр в умовах проведення реакції. Таким чином, каталітичні перетворення спостерігаються лише у випадку використання PEO/PEI та NiO/Al_2O_3.

У таблиці представлено відсотковий кількісний склад продуктів реакції гліцеролу з CO_2 у ацетонітрилі без і з каталізаторами. Об'єм реакційної суміші становив 10 мл, з яких 5 мл – гліцерол (68,5 ммоль) та 5 мл ацетонітрилу (95,8 ммоль), до якої додавали 0,1 мл додекану (0,45 ммоль, або 0,045 ммоль/мл). Оскільки додекан у процесі не перетворюється, відносно вмісту додекану визначали вміст інших продуктів.

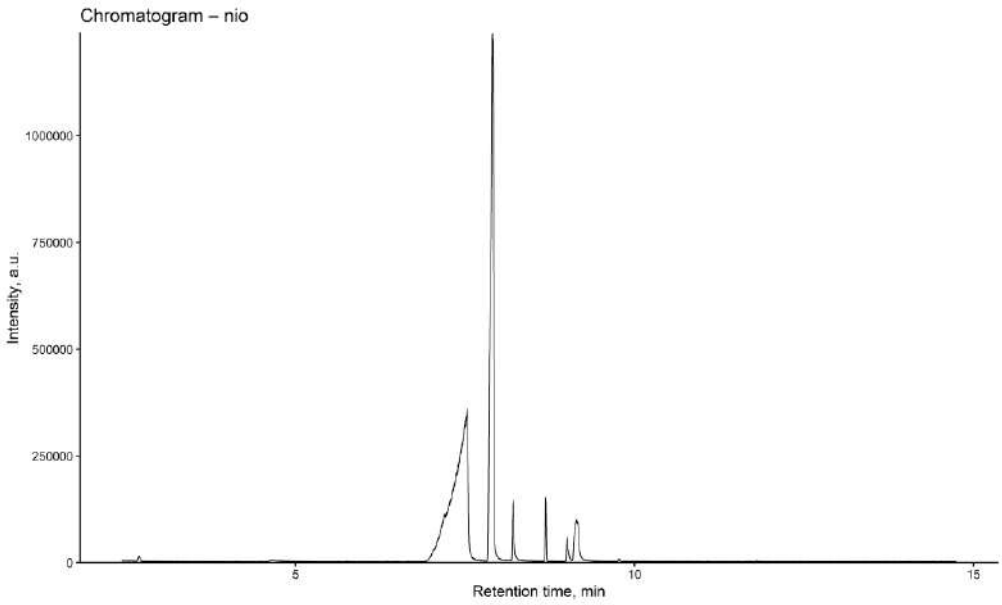


Рис. Типова хроматограма продуктів взаємодії гліцеролу та CO_2 з гетерогенним каталізатором (на прикладі NiO/Al_2O_3).

Таблиця. Кількісний склад продуктів реакції, ммоль/мл (%)

Продукти реакції	**Без каталізатора**	**ОГр**	**PEO/ PEI**	**Fe_2O_3/ Al_2O_3**	**NiO/ Al_2O_3**	**Co_3O_4/ Al_2O_3**
1-аміноетанол+ ін. компоненти	4 (80,9%)	7,425 (99%)	1,25 (52,9%)	0,018 (27,2%)	1,67 (52%)	0,055 (52,2%)
1-моноацетин	0,91 (18,2%)	0,03 (0,4%)	0,85 (35,8%)	0,005 (6,8%)	1,23 (38,4%)	0,005 (4,8%)
2-моноацетин	–	–	0,05 (2,2%)	–	0,074 (2,3%)	–
додекан	0,045 (0,9%)	0,045 (0,6%)	0,045 (1,9%)	0,045 (66%)	0,045 (1,4%)	0,045 (43%)
діацетин	–	–	0,012 (0,5%)	–	0,03 (1%)	–
етилен карбонат+ ГК	–	–	0,16 (6,7%)	–	0,16 (4,9%)	–

Аналіз представленій у таблиці 1 даних вказує на те, що за наведених умов головним компонентом є продукт перетворення ацетонітрилу, а саме 1-аміноетанол та інші компоненти, які не розділяються з 1-аміноетанолом на хроматограмі. Основним продуктом перетворення гліцеролу в усіх випадках є 1-моноацетин, утворення якого є наслідком взаємодії гліцеролу та оцтової кислоти. Оцтова кислота утворюється при взаємодії ацетаміду та води, який, в свою чергу, утворюється при взаємодії ацетонітрилу та води. Оцтова кислота є типовою домішкою в ацетонітрилі. Додаткова кількість оцтової кислоти утворюється в процесі реакції внаслідок взаємодії домішок води, що міститься в гліцеролі, з ацетонітрилом. Утворення ацетинів також супроводжується виділенням води, що також реагує з ацетонітрилом та ацетамідом. Окремо було визначено за відповідними формулами, що найвищий рівень конверсії гліцеролу (21,9%) було досягнуто за умов використання NiO/Al_2O_3. При цьому селективність становила 10%, а вихід відповідних продуктів – 2,2%. У випадку використання PEO/PEI конверсія гліцеролу становила 15,6%, селективність – 15%, а вихід – 2,34%. Таким чином, найбільший вихід по карбонатам забезпечує використання каталізатору PEO/PEI.

Слід також зазначити, що альтернативним перспективним підходом у виробництві ГК є переетерифікація гліцеролу диметилкарбонатом або іншими ациклічними органічними карбона-

тами (Lukato et al., 2021; Sahani et al., 2021). Однак сировина, така як диметил- або діетилкарбонат, необхідна для цього підходу, є дорогою, що робить цей шлях комерційно менш вигідним (Lukato et al., 2021). Також, ГК можна отримувати шляхом карбонілювання гліцеролу сечовиною, однак така реакція призводить до утворення шкідливих побічних продуктів, таких як біурет та ізоціанова кислота, а також аміак (Aresta et al., 2009). Більше того, різну ефективність демонструє використання інших каталітичних систем, зокрема $La_2O_2CO_3$ /ZnO, Au/$ZnWO_4$ –ZnO, галогеномодифікованих оксидів Zn–Al–La (4:1:1), прожарених солей металів ($AgNO_3$, $SnCl_2$, $Zn(NO_3)_2$), а також міді, нанесеної на CaO, MgO, La_2O_3, Al_2O_3, ZrO_2, змішані оксиди Mg–Al–Zr, MCM-41 та цеоліт HZSM-5 (Lukato et al., 2021; Whang et al., 2019). Також можливо отримувати ГК шляхом прямого карбоксилювання гліцеролу в надкритичному вмісту CO_2, використовуючи цеоліти та основні іонообмінні смоли (Vieville et al., 1998).

За відсутності дегідратуючих або сполучних агентів виходи ГК залишаються низькими (Lukato et al., 2021). У присутності кислотних дегідратуючих агентів або умов, що сприяють утворенню кислоти, гліцерол може перетворюватися на ацетини: моноацетин, діацетин та триацетин. Ці продукти мають практичне застосування: моноацетини – у косметиці та медицині, діацетини та триацетини – як паливні добавки, а також у фармацевтичній та харчовій промисловості (Lukato et al., 2021; Kong et al., 2016). Виробництво ди- та триацетину зазвичай здійснюють за допомогою двостадійного процесу з оцтовою кислотою та оцтовим ангідридом. Під час карбоксилювання гліцеролу з CO_2 у присутності ацетонітрилу останній може гідролізуватися з утворенням оцтової кислоти, що призводить до побічної естерифікації гліцеролу та формування ацетинів. Ці результати демонструють, що вихід і селективність ГК можна покращити шляхом індивідуального дизайну каталізатора та вибору відповідних дегідратуючих агентів і додаткових реагентів, що і може стати предметом подальших досліджень.

Висновки

За результатами проведеного дослідження було встановлено, що змішана оксидна система NiO/Al_2O_3 та полімерний матеріал PEO/PEI виявили найвищу каталітичну активність щодо перетворення гліцеролу, тоді як Co_3O_4 /Al_2O_3, Fe_2O_3 /Al_2O_3 та оксид графену не сприяли утворенню карбонатів. Шляхом хроматографічного та мас-спектрометричного аналізу встановлено, що основними продуктами реакції перетворення гліцеролу є моноацетини, діацетин, а також суміш етилен карбонату та гліцерол карбонату. Встановлено, що найвищий рівень конверсії гліцеролу (21,9%) забезпечує каталізатор NiO/Al_2O_3, тоді як найвищий вихід карбонатних продуктів (2,34%) досягається при використанні полімерного каталізатора PEO/PEI. Результати дослідження підтверджують доцільність застосування каталітичного перетворення гліцеролу з карбон(IV) оксидом як напрямок утилізації надлишкового гліцеролу з одержанням продуктів з підвищеною доданою вартістю. Отримані експериментальні дані створюють передумови для подальшої оптимізації складу каталізаторів та умов проведення процесу з метою підвищення селективності й виходу гліцерол карбонату.

Інформація про фінансову підтримку, подяки: Робота виконана за часткової підтримки науково-дослідного проєкту ВЦП КНУ ім. Т. Шевченка при НАН України (2026-27 рр., № Держреєстрації: 0126U003053).

Конфлікт інтересів: автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

References

1. Aresta M., Dibenedetto A., Nocito F., Ferragina C. Valorization of bio-glycerol: new catalytic materials for the synthesis of glycerol carbonate via glycerolysis of urea. *Journal of Catalysis*. 2009. Vol. 268. P. 106–114. https://doi.org/10.1016/j.jcat.2009.09.008.
2. Ayoub M., Abdullah A. Z. Critical review on the current scenario and significance of crude glycerol resulting from biodiesel industry towards more sustainable renewable energy industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 16. P. 2671–2686. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.054.
3. Blume R. Y., Rakhmetov D. B., Blume Y. B. Evaluation of Ukrainian *Camelina sativa* germplasm productivity and analysis of its amenability for efficient biodiesel production. *Industrial Crops and Products*. 2022. Vol. 187B. P. 115477. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115477.
4. Bychko I., Abakumov A., Didenko O., Chen M., Tang J., Strizhak P. Differences in the structure and functionalities of graphene oxide and reduced graphene oxide obtained from graphite with various degrees of graphitization. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2022. Vol. 164. P. 110614. https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2022.110614.
5. Checa M., Nogales-Delgado S., Montes V., Encinar J. M. Recent advances in glycerol catalytic valorization: a Review. *Catalysts*. 2020. Vol. 10 (11). P. 1279. https://doi.org/10.3390/ catal10111279.

6. Hengsbach R., Bychko I., Schwarz S., Strizhak P., Fahmi A., Sustainable bifunctional electrospun hybrid nanofibers for CO_2 capture and conversion. *Macromolecular Rapid Communications.* 2025. Vol. 46 (14). P. e2500050. https://doi.org/10.1002/marc.202500050.
7. Kong P. S., Aroua M. K., Daud W. M. A. W., Lee H. V., Cognet P., Peres Y. Catalytic role of solid acid catalysts in glycerol acetylation for the production of bio-additives: a review. *RSC Advances*. 2016. Vol. 6. P. 68885–68905. https://doi.org/10.1039/C6RA10686B.
8. Lukato S., Kasozi G. N., Naziriwo B., Tebandeke E. Glycerol carbonylation with CO_2 to form glycerol carbonate: A review of recent developments and challenges. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*. 2021 Vol. 4. P. 100199. https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100199.
9. Meylan F. D., Moreau V., Erkman S. CO_2 utilization in the perspective of industrial ecology, an overview. *Journal of CO_2 Utilization*. 2015. Vol. 12. P. 101–108. https://doi.org/10.1016/ j.jcou.2015.05.003.
10. Ratanapariyanuch K., Clancy J., Emami S., Cutler J., Reaney M. J. T. Physical, chemical, and lubricant properties of Brassicaceae oil. *European Journal of Lipid Science and Technology*. 2013. Vol. 115. P. 1005–1012. https://doi.org/10.1002/ejlt.201200422.
11. Sahani S., Upadhyay S. N., Sharma Y. C. Critical review on production of glycerol carbonate from byproduct glycerol through transesterification. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2021. Vol. 60. P. 67–88. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c05011.
12. Stamenković O. S., Gautam K., Singla-Pareek S. L., Dhankher O. P., Djalović I. G., Kostić M. D., Mitrović P. M., Pareek A., Veljković V. B. Biodiesel production from camelina oil: Present status and future perspectives. *Food and Energy Security.* 2021. Vol. 12. P. e340. https://doi.org/10.1002/fes3.340.
13. Takagaki A., Iwatani K., Nishimura S., Ebitani K. Synthesis of glycerol carbonate from glycerol and dialkyl carbonates using hydrotalcite as a reusable heterogeneous base catalyst. *Green Chemistry*. 2010. Vol. 12. P. 578–581. https://doi.org/10.1039/B925404H.
14. Vieville C., Yoo J.W., Pelet S., Mouloungui Z. Synthesis of glycerol carbonate by direct carbonatation of glycerol in supercritical CO_2 in the presence of zeolites and ion exchange resins. *Catalysis Letters*. 1998. Vol. 56. P. 245–247. https://doi.org/10.1023/A:1019050205502.
15. Whang H. S., Lim J., Choi M. S., Lee J., Lee H. Heterogeneous catalysts for catalytic CO2 conversion into value-added chemicals. *BMC Chemical Engineering*. 2019. Vol. 1. P. 9. https://doi.org/10.1186/s42480-019-0007-7.

BLYUM E. Y.[1], BLUME R. Y.[2], BYCHKO I. B.[1]
[1] L. V. Pisarzhevskii Institute of Physical Chemistry, Natl. Acad. Sci. Ukraine, Ukraine, 03028, Kyiv, Nauky ave., 31
[2] Institute of Food Biotechnology and Genomics, Natl. Acad. Sci. Ukraine, Ukraine, 04123, Kyiv, Baidy-Vyshnevetskoho str., 2A

SYNTHESIS OF GLYCEROL CARBONATE VIA HETEROGENEOUS CATALYSIS FOR EFFECTIVE UTILIZATION OF BYPRODUCTS FROM PLANT OIL-BASED BIODIESEL PRODUCTION

Aim. To establish the possibility of using heterogeneous catalysts of different nature (based on carbon (graphene oxide), polymer (PEO/PEI) and oxide systems (Fe_2O_3/Al_2O_3, Co_3O_4/Al_2O_3 and NiO/Al_2O_3)) in the catalytic conversion of glycerol with carbon(IV) oxide for the effective use of by-products of vegetable oil-based biodiesel production. ***Methods.*** Synthesis of glycerol carbonate via heterogeneous catalysis, gas chromatography, mass spectrometry. ***Results.*** It was shown that the reaction of glycerol with carbon(IV) oxide in the presence of heterogeneous catalysts is possible only under conditions of elevated temperatures and pressures and in the presence of a dehydrating agent (acetonitrile). It was established that the catalytic activity significantly depends on the chemical nature and stability of the materials, with the highest glycerol conversion (21.9%) provided by the NiO/Al_2O_3 catalyst, and the highest yield of carbonate products (2.34%) achieved when using the PEO/PEI polymer catalyst. ***Conclusions.*** The results obtained indicate the prospects for the use of heterogeneous catalysts in the processes of glycerol and CO_2 utilization and can be the basis for further optimization of the catalyst composition and reaction conditions in order to increase the selectivity and yield of glycerol carbonate as a valuable substance.

Keywords: glycerol, carbon dioxide, glycerol carbonate, heterogeneous catalysis, green chemistry.

Надходження статті: 15 травня 2026 р.
Прийняття до друку після рецензування: 30 червня 2026 р.
Публікація: 30 листопада 2026 р.