

УДК 66.094.942

doi: 10.20998/2413-4295.2026.01.15

ТРАНСЕСТЕРИФІКАЦІЯ ТРИГЛЦЕРИДІВ СПИРТАМИ C₁–C₃ У ПРИСУТНОСТІ АНІОНООБМІННОЇ СМОЛИ АВ-17-8**О. В. ЧЕРНІЧЕНКО, Ю. Р. МЕЛЬНИК***

кафедра технології органічних продуктів, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, УКРАЇНА
*e-mail: yurii.r.melnyk@lpnu.ua

АНОТАЦІЯ Наведено результати дослідження закономірностей трансестерифікації тригліцеридів олій із підвищеним вмістом вільних жирних кислот (зокрема лляної, ріпакової, нерафінованої соняшникової та рицинової) аліфатичними спиртами C₁–C₃ у присутності аніонообмінної смоли АВ-17-8. Встановлено залежність конверсії тригліцеридів за 150 хв. та початкової швидкості трансестерифікації тригліцеридів від довжини ланцюга аліфатичного спирту. Показано, що трансестерифікація тригліцеридів метанолом та етанолом дає змогу досягнути їх конверсії близької або вищої 80 %, а при трансестерифікації нерафінованої соняшникової олії конверсія досягає 92,4–94,6 %. Результати трансестерифікації тригліцеридів аніонообмінною смолою АВ-17-8 свідчать, що присутні в реакційній суміші вільні жирні кислоти в реакцію естерифікації практично не вступають, а їх конверсія не перевищує 3,9 %. Максимальне вилучення жирних кислот із продуктів реакції трансестерифікації тригліцеридів олій із підвищеним вмістом вільних жирних кислот досягається за умови їх обробки у катіонообмінною смолою КУ-2-8 у кількості 20 мас. %. Абсорбція вільних кислот на іонообмінній смолі за її вмісту у продуктах реакції 20 мас. % забезпечує практично повне вилучення вільні жирні кислоти із реакційної суміші за умови, що її кислотне число не перевищує 4,55 мг КОН/г. Встановлено, що загальний ступінь вилучення вільних жирних кислот із продуктів реакції при її обробці катіонообмінною смолою КУ-2-8 досягає 96,8–99,3 %, а залишкове кислотне число продуктів реакції не перевищує 0,13 мг КОН/г. Показано, що обробка реакційної суміші катіонообмінною смолою КУ-2-8 може бути ефективним способом вилучення вільних жирних кислот із продуктів реакції трансестерифікації нерафінованих олій аліфатичними спиртами.

Ключові слова: трансестерифікація; тригліцериди; аліфатичні спирти; аніонообмінна смола АВ-17-8; катіонообмінна смола КУ-2-8.

TRANSESTERIFICATION OF TRIGLYCERIDES WITH C₁–C₃ ALCOHOLS CATALYZED BY ANION EXCHANGE RESIN AV-17-8**O. CHERNICHENKO, Yu. MELNYK**

Department of Organic Products Technology, Lviv Polytechnic National University, Lviv, UKRAINE

ABSTRACT The results of a study on the regularities of transesterification of triglycerides from oils with a high content of free fatty acids (in particular, linseed, rapeseed, unrefined sunflower, and castor oils) with C₁–C₃ aliphatic alcohols using of the anion exchange resin AV-17-8 are presented. The dependence of triglyceride conversion after 150 min and the initial rate of transesterification on the chain length of the aliphatic alcohol was established. It was demonstrated that the transesterification of triglycerides with methanol and ethanol enables conversions of nearly 80% or higher, while in the case of unrefined sunflower oil, the conversion reaches 92.4–94.6%. The results obtained using the anion exchange resin AV-17-8 indicate that the free fatty acids present in the reaction mixture undergo esterification to a negligible extent, with their conversion not exceeding 3.9%. Maximum removal of free fatty acids from the products of triglyceride transesterification of oils with a high free fatty acid content is achieved by treatment with the cation exchange resin KU-2-8 in an amount of 20 wt%. Adsorption of free fatty acids on the ion exchange resin at a content of 20 wt% in the reaction products ensures almost complete removal of free fatty acids from the reaction mixture, provided that the acid number does not exceed 4.55 mg KOH/g. It was found that the overall degree of free fatty acid removal from the reaction products upon treatment with the cation exchange resin KU-2-8 reaches 96.8–99.3%, and the residual acid number of the reaction products does not exceed 0.13 mg KOH/g. Thus, treatment of the reaction mixture with the cation exchange resin KU-2-8 can serve as an effective method for removing free fatty acids from the products of transesterification of unrefined oils with aliphatic alcohols.

Keywords: transesterification; triglyceride; aliphatic alcohols; anion exchange resin AV-17-8; cation exchange resin KU-2-8.

Вступ

Перспективним напрямком досліджень є застосування для трансестерифікації неочищеної або відпрацьованої олії. Така сировина є доступнішою та дешевшою за рафіновані олії. Разом з тим, часто такі олії не відповідають тим вимогам, які висувають до сировини для трансестерифікації при використанні гомогенних основних каталізаторів, зокрема щодо

вмісту вільних жирних кислот. Для того, щоб забезпечити можливість використання олійної та жирової сировини із підвищеним вмістом вільних жирних кислот використовують двостадійну трансестерифікацію [1] або трансестерифікацію на гомогенних кислотних чи гетерогенних каталізаторах, які менш чутливі до присутності вільних жирних кислот в реакційній суміші [2,3]. При здійсненні трансестерифікації у дві стадії на першій як

катализатор використовують кислоту Бренстеда, найчастіше сульфатну. На цій стадії відбувається естерифікація вільних жирних кислот, далі, після нейтралізації або відмивання кислотного катализатора, у присутності гомогенного основного катализатора здійснюють трансестерифікацію. Кислотні гомогенні та гетерогенні катализатори одночасно катализують реакції естерифікації та трансестерифікації. Проте за високого початкового вмісту вільних жирних кислот в реакційній суміші часто повне перетворення їх у естери не досягається, а при одержанні естерів вільних жирних кислот вміст вільних кислот у продуктах є небажаним.

Трансестерифікацію тригліцеридів із підвищеним вмістом кислот можна здійснювати за умови каталізу ензимами, зокрема ліпазою [4]. Авторами наведено детальну характеристику складу кокосової олії арірі та досліджено вплив мольного співвідношення олія : етанол (1 : 4, 1 : 6 та 1 : 9) та вмісту катализатора (2, 5 та 10 мас. %) на вміст етилових естерів вищих жирних кислот у продуктах реакції за умови каталізу ліпазою *Burkholderia ceracia*. В роботі показано, що при тривалості реакції 4 год. вміст етилових естерів вільних жирних кислот у продуктах становить 62,1–67,1 %. Авторами встановлено, що за умови каталізу іммобілізованою ліпазою найбільший вплив на вміст етилових естерів чинить мольне співвідношення олія : етанол (оптимальне значення 1 : 4), а при каталізі вільною ліпазою – вміст катализатора (оптимальне значення концентрації ензиму становить 10 мас. %).

Як ефективний чинник впливу на процес трансестерифікації широкого спектру олій та жирів, зокрема відпрацьованої олії, відходів рафінування олій тощо, розглядають електрокатализ [5]. Авторами показано, що наноструктуровані матеріали забезпечують високі результати завдяки своїм відмінним механічним, електричним та оптичним характеристикам. В роботі також показано, що використання іонних рідин у реакції трансестерифікації розширило спектр можливої до застосування жирової сировини. Авторами зроблено висновок про необхідність подальшого розроблення ефективних та стабільних електрокатализаторів, оскільки існуючі катализатори з часом деградують, мають низьку селективність або містять дорогі благородні метали.

У роботі [6] здійснено порівняння результатів трансестерифікації тригліцеридів отриманих з водоростей метанолом у присутності лужних та кислотних гомогенних і гетерогенних катализаторів, а також ферментативного каталізу процесу та надкритичної трансестерифікації. Зокрема показано, що при трансестерифікації тригліцеридів отриманих з *Chlorella protothecoides* за температури 60 °С, мольного співвідношення метанол : олія 7 : 1 та вмісту катализатора – гідроксиду натрію – 0,5 мас. % за 60 хв. досягається вихід метилових естерів вищих жирних кислот 97,66 %. Разом з тим, авторами

наголошено, що через високий вміст вільних жирних кислот, для трансестерифікації такої жирової сировини краще застосовувати кислотні катализатори або гетерогенні катализатори. Показано, що для досягнення виходу метилових естерів вищих жирних кислот понад 99 % за умови каталізу сульфатною кислотою реакцію слід здійснювати протягом 24 год. за температури 65 °С, мольного співвідношення метанол : олія 30 : 1 та вмісту катализатора 0,5 моль/л.

Трансестерифікацію тригліцеридів нерафінованих олій *Salvadora alii* і *Thespesia populneooides* досліджено за умов ультразвукової кавітації [7]. Авторами встановлено, що максимальний вихід метилових естерів з олії *Salvadora alii* становить близько 92 % досягається за мольного співвідношення тригліцериди : спирт 1 : 10, вмісту катализатора 3 мас. % за 30 хв. У випадку трансестерифікації олії *Thespesia populneooides* вихід метилових естерів є дещо нижчим і становить 88,6 %, проте він досягається за нижчого співвідношення тригліцериди спирт – 1 : 6 та близького вмісту катализатора – 3,5 мас. %. Авторами встановлено, що перемішування реакційної суміші за допомогою ультразвукової кавітації має істотні переваги перед механічним перемішуванням як з точки зору досягнутої швидкості реакції трансестерифікації, так і з точки зору її тривалості.

Ультразвукову кавітацію запропоновано також використовувати за умови гетерогенного каталізу трансестерифікації трипальмітату метанолом [8]. Авторами як катализатор досліджено оксид кальцію, отриманий прожарюванням вапняку за температури 800 °С. Активність дослідженого катализатора автори порівнювали із комерційним оксидом кальцію. В роботі показано, що за 60 хв. за температури 50 °С та вмісту катализатора 30 мг у реакційній суміші, яка складається із 0,1 моль трипальмітату та 0,3 моль спирту, вихід метилових естерів пальмітинової кислоти досягає 44,6 %, та є істотно вищим за вихід метилових естерів на комерційному оксиді кальцію – 32,3 %. Авторами визначено константу швидкості реакції та встановлено, що реакцію задовільно описує псевдо-кінетична модель другого порядку.

Іншим варіантом застосування оксиду кальцію як гетерогенного катализатора трансестерифікації є його нанесення на твердий носій, наприклад оксид алюмінію [9]. Авторами досліджено трансестерифікацію метанолом відпрацьованої та свіжої кулінарної олії. Встановлено, що за температури 60 °С, мольного співвідношення олія : метанол 1 : 18 та вмісту катализатора 7 мас. % дещо вищий вихід метилових естерів вищих жирних кислот досягається при метанолізі свіжої кулінарної олії і становить 75,63 %, тоді як при трансестерифікації відпрацьованої олії вихід метилових естерів становить 72,33 %. Такі результати свідчать про високу ефективність гетерогенного катализатора при переробці олії з підвищеним вмістом вільних жирних кислот.

Трансестерифікацію нехарчової олійної сировини запропоновано здійснювати на гетерогенному Ni-Mg/Al-оксидному каталізаторі [10]. Трансестерифікацію олії *Camelina sativa* метанолом здійснювали у реакторі з мішалкою за температури 140 °С, тиску 0,5 МПа, мольного співвідношення метанол : олія 18 : 1 та вмісту гетерогенного каталізатора 3 мас. %. Встановлено, що при здійсненні реакції в одну стадію вихід метилових естерів вищих жирних кислот досягає 96,4 %, а при проведенні двостадійного процесу вихід естерів перевищує 97 %.

Таким чином, при переробленні тригліцеридів олій із підвищеним вмістом вільних жирних кислот найбільш доцільно використовувати гетерогенні каталізатори. Якщо вміст вільних жирних кислот залишається високим навіть після завершення реакції трансестерифікації, для їх повнішого вилучення із продуктів реакції доцільно обробляти реакційну суміш адсорбентами [11].

Мета роботи

Метою дослідження було встановити закономірності трансестерифікації тригліцеридів олій із підвищеним вмістом вільних жирних кислот аліфатичними спиртами C_1-C_3 при каталізі аніонообмінною смолою АВ-17-8 та ефективність адсорбції залишкових вільних кислот із продуктів реакції.

Виклад основного матеріалу

У дослідженнях використовували олії із підвищеним вмістом вільних жирних кислот, зокрема ріпакову (кислотне число 17,2 мг КОН/г олії), лляну (кислотне число 5,2 мг КОН/г олії), нерафіновану соняшникову олію (кислотне число 3,8 мг КОН/г олії) та ріцинову (кислотне число 2,5 мг КОН/г олії). Трансестерифікацію олій здійснювали метанолом, етанолом і пропан-1-олом. Етанол (залишковий вміст води менше 0,5 мас %) сушили над прожареним сульфатом магнію. Як каталізатор використовували аніонообмінну смолу АВ-17-8 (вищий гатунок), як адсорбент – катіонообмінну смолу КУ-2-8 (вищий гатунок). Аніонообмінну смолу АВ-17-8 використовували в ОН-формі, а катіонообмінну смолу КУ-2-8 – в Н-формі.

Трансестерифікацію тригліцеридів вказаних олій аліфатичними спиртами C_1-C_3 здійснювали у тригорлій колбі із зворотним холодильником. Вміст каталізатора – аніонообмінної смоли АВ-17-8 – становив 2 мас. %, мольне співвідношення тригліцериди : спирт – 1 : 4,3. Температура реакції становила 333 К при метанолізі та 348 К при трансестерифікації олій етанолом та пропан-1-олом.

Після відділення каталізатора продукти реакції змішували із катіонообмінною смолою КУ-2-8 у кількості 20 мас. % і при перемішуванні за

температури 323 К здійснювали абсорбцію вільних жирних кислот протягом 120 хв. [11].

У відібраних пробах хроматографічно визначали вміст відповідного спирту, за яким розраховували його конверсію та конверсію тригліцеридів. Визначали початкове та кінцеве кислотне число реакційної суміші, за яким розраховували конверсію вільних жирних кислот. Після обробки продуктів реакції адсорбентом та його відділення також визначали кислотне число. За його значенням розраховували ступінь вилучення вільних кислот під час адсорбції та загальний ступінь вилучення вільних жирних кислот із продуктів реакції.

Досліджено закономірності трансестерифікації тригліцеридів олій із підвищеним вмістом вільних жирних кислот (зокрема лляної, ріпакової, нерафінованої соняшnikової та рицинової) аліфатичними спиртами C_1-C_3 у присутності аніонообмінної смоли АВ-17-8 як каталізатора. Встановлено, що при трансестерифікації тригліцеридів вказаних олій спостерігаються схожі закономірності.

Конверсія тригліцеридів за перші 15 хв. реакції трансестерифікації знижується у ряду спиртів метанол > етанол > пропан-1-ол (табл. 1).

Таблиця 1 – Трансестерифікація тригліцеридів олій із підвищеним вмістом вільних жирних кислот аліфатичними спиртами C_1-C_3 у присутності аніонообмінної смоли АВ-17-8. Мольне співвідношення тригліцериди олій : спирт – 1 : 4,3, вміст каталізатора – аніонообмінної смоли АВ-17-8 – 2 мас. %

Олія	Конверсія тригліцеридів		Початкова швидкість трансестерифікації, $г \cdot 10^4, \text{ моль}/(\text{л} \cdot \text{с})$
	15 хв.	150 хв.	
Метанол, температура – 333 К			
Лляна	19,4	86,7	1,9
Ріпакова	22,6	90,8	2,2
Соняшnikова (нерафінована)	24,1	94,6	2,3
Рицинова	16,8	81,7	1,6
Етанол, температура – 348 К			
Лляна	17,3	83,0	1,6
Ріпакова	21,1	85,0	1,9
Соняшnikова (нерафінована)	22,0	92,4	2,0
Рицинова	15,9	78,9	1,5
Пропан-1-ол, температура – 348 К			
Лляна	5,8	64,9	1,1
Ріпакова	7,3	65,6	1,4
Соняшnikова (нерафінована)	7,9	69,8	1,5
Рицинова	3,2	61,9	0,6

Конверсія тригліцеридів за цей період становить 16,8–24,1 % при метанолізі та є незначно нижчою при етанолізі – 15,9–22,0 %. При

трансестерифікації тригліцеридів пропан-1-олом за 15 хв. реакції є істотно нижчою і не перевищує 7,9 %.

Максимальна початкова швидкість реакції спостерігається при трансестерифікації тригліцеридів ріпакової та нерафінованої соняшникової олій і становить $2,2\text{--}2,3 \cdot 10^{-4}$ моль/(л·с) при метанолізі та $1,9\text{--}2,0 \cdot 10^{-4}$ моль/(л·с) при етанолізі. Початкова швидкість реакції найнижчою є при трансестерифікації тригліцеридів пропан-1-олом. При трансестерифікації тригліцеридів ріпакової та нерафінованої соняшникової олій швидкість становить $1,4\text{--}1,5 \cdot 10^{-4}$ моль/(л·с), а при трансестерифікації рицинової олій є ще нижчою – лише $0,6 \cdot 10^{-4}$ моль/(л·с) (табл. 1).

Конверсія тригліцеридів олій із підвищеним вмістом вільних жирних кислот при їх трансестерифікації аліфатичними спиртами $C_1\text{--}C_3$, яка досягається за 150 хв. реакції, також знижується в рядя спиртів метанол > етанол > пропан-1-ол (табл. 1).

Оскільки трансестерифікацію тригліцеридів олій із підвищеним вмістом вільних жирних кислот здійснювали в присутності аніонообмінної смоли АВ-17-8, яка не каталізує реакцію естерифікації, кислотне число реакційної суміші під час реакції практично не змінюється. Конверсія вільних жирних кислот при трансестерифікації досліджених олій аліфатичними спиртами $C_1\text{--}C_3$ знаходиться в межах 1,5–3,9 % (табл. 2).

Подальшу обробку продуктів реакції з метою вилучення вільних жирних кислот здійснювали у присутності катіонообмінної смоли КУ-2-8, яка продемонструвала високу ефективність при адсорбції олеїнової кислоти з її модельної суміші з рафінованою соняшниковою олією [13].

Встановлено, що в результаті обробки продуктів реакції у присутності 20 мас. % катіонообмінної смоли КУ-2-8 за температури 323 К протягом 120 хв. кислотне число знижується до 0,03–0,13 мг КОН/г (табл. 2). Такі значення кислотного числа реакційної суміші спостерігаються при обробці продуктів трансестерифікації тригліцеридів лляної, нерафінованої соняшникової та рицинової олій. Значення початкових кислотних чисел для реакційних сумішей цих олій із аліфатичними спиртами $C_1\text{--}C_3$ знаходяться в межах 1,93–4,55 мг КОН/г.

При обробці продуктів трансестерифікації тригліцеридів ріпакової олій аліфатичними спиртами $C_1\text{--}C_3$ також спостерігається значне зниження кислотного числа – на 7,12–8,48 мг КОН/г. Проте через високе початкове значення кислотного числа реакційної суміші, яке становить 13,32–14,85 мг КОН/г, досягнути вищого ступеня вилучення вільних жирних кислот за рахунок обробки продуктів реакції у присутності катіонообмінної смоли КУ-2-8 не вдалося.

Загалом, при трансестерифікації тригліцеридів олій із підвищеним вмістом вільних жирних кислот, за умови початкового кислотного числа реакційної

суміші до 4,55 мг КОН/г, в результаті реакції трансестерифікації та подальшої обробки у присутності катіонообмінної смоли КУ-2-8 досягається загальний ступінь вилучення кислот із продуктів реакції в межах 96,8–99,3 %.

Таблиця 2 – Зміна кислотного числа реакційної суміші під час трансестерифікації тригліцеридів аліфатичними спиртами $C_1\text{--}C_3$ у присутності аніонообмінної смоли АВ-17-8 та її подальшої обробки катіонообмінною смолою КУ-2-8. Мольне співвідношення тригліцериди олій : спирт – 1 : 4,3, вміст каталізатора аніонообмінної смоли АВ-17-8 – 2 мас. %

Олія	Кислотне число, мг КОН/г реакційної суміші			К, %	Ступінь вилучення вільних жирних кислот, %	
	початкове	після реакції	після обробки		після обробки	загальний
Метанол, температура – 333 К						
Лляна	4,55	4,37	0,11	3,9	97,5	97,6
Ріпакова	14,85	14,50	6,02	2,4	58,5	59,5
Соняшникова (нерафінована)	3,80	3,70	0,06	2,7	98,3	98,3
Рицинова	2,16	2,09	0,03	3,3	98,4	98,5
Етанол, температура – 348 К						
Лляна	4,26	4,17	0,09	2,2	97,9	97,9
Ріпакова	14,08	13,90	6,17	1,3	55,6	56,2
Соняшникова (нерафінована)	3,90	3,80	0,13	2,5	96,7	96,8
Рицинова	2,03	1,96	0,05	3,3	97,4	97,5
Пропан-1-ол, температура – 348 К						
Лляна	4,07	3,99	0,03	2,2	99,3	99,3
Ріпакова	13,32	13,11	5,99	1,6	54,3	55,0
Соняшникова (нерафінована)	3,70	3,61	0,10	2,3	97,1	97,2
Рицинова	1,93	1,87	0,05	3,4	97,4	97,5

Обговорення результатів

Отримані результати свідчать, що на конверсію тригліцеридів у реакції трансестерифікації найбільший вплив має довжина ланцюга аліфатичного спирту (табл. 1). Як конверсія тригліцеридів за 150 хв. реакції, так і початкова швидкість реакції закономірно знижуються при збільшенні довжини вуглецевого ланцюга спирту. Встановлено, що при переході від метанолу до етанолу зменшення конверсії тригліцеридів та початкової швидкості реакції є менш помітним, ніж при переході від етанолу до пропан-1-олу (табл. 1). Такі результати очевидно зумовлені тим, що метанолізі здійснюють за температури 333 К, а трансестерифікацію тригліцеридів етанолом та пропан-1-олом – при 348 К. Очевидно, що підвищення температури реакції на 15 К значною мірою компенсує нижчу активність етанолу порівняно

з метанолом. Такі результати добре корелюють із результатами отриманими при трансестерифікації рафінованої соняшникової олії аліфатичними спиртами у присутності аніонообмінної смоли АВ-17-8 [12].

При трансестерифікації тригліцеридів олій із підвищеним вмістом вільних жирних кислот метанолом та етанолом за 150 хв. реакції досягається висока їх конверсія, яка для всіх досліджених олій (за винятком етанолізу рицинової олії) перевищує 80 %. При метанолізі нерафінованої соняшникової олії досягається конверсія тригліцеридів від 92,4–94,6 %. Такі результати свідчать також про вплив виду олії на конверсію тригліцеридів, хоча однозначний висновок зробити не можна, оскільки досліджувані олії крім походження істотно відрізняються вмістом вільних жирних кислот. Разом з тим, вільні жирні кислоти присутні у складі олій за умов реакції трансестерифікації практично не реагують. Досягнута в реакції конверсія кислот, свідчить про те, що досягнути зменшення вмісту вільних кислот за рахунок їх етерифікації при каталізі аніонообмінною смолою АВ-17-8 не можливо.

Результати обробки продуктів реакції у присутності катіонообмінної смоли КУ-2-8, показують, що при обробці реакційної суміші із кислотним числом до 4,55 мг КОН/г досягається практично повне вилучення вільних жирних кислот із реакційної суміші. Результати отримані при обробці ріпакової олії, кислотне число якої становить 17,2 мг КОН/г олії, показують, що обробка катіонообмінною смолою дає змогу знизити кислотне число продуктів реакції на понад 7 мг КОН/г. Це дає змогу припустити, що адсорбція вільних жирних кислот катіонообмінною смолою може бути ефективною навіть при обробці реакційної суміші з кислотним числом близько 7 мг КОН/г.

Для повного вилучення вільних жирних кислот із продуктів трансестерифікації дослідженої ріпакової олії можна запропонувати двостадійну обробку – після відділення адсорбенту (катіонообмінної смоли), здійснювати повторну обробку із свіжою його порцією за тих самих умов.

Висновки

Досліджено вплив аніонообмінної смоли АВ-17-8 на трансестерифікацію тригліцеридів олій із підвищеним вмістом вільних жирних кислот аліфатичними спиртами С₁–С₃. Встановлено, що конверсія тригліцеридів за 150 хв. та початкова швидкість реакції трансестерифікації закономірно знижуються у ряду метанол > етанол > пропан-1-ол. Показано, що при метанолізі та етанолізі конверсія тригліцеридів досліджених олій близька або перевищує 80 %. Показано, що при каталізі аніонообмінною смолою АВ-17-8 за умов реакції трансестерифікації вміст вільних жирних кислот практично не змінюється – їх конверсія не перевищує

3,9 %. Встановлено, що обробка продуктів реакції трансестерифікації тригліцеридів катіонообмінною смолою КУ-2-8 в кількості 20 мас. % як адсорбентом, дає змогу практично повністю вилучити вільні жирні кислоти для реакційних сумішей, кислотне число яких не перевищує 4,55 мг КОН/г. Такий результат дає змогу зробити висновок про можливість отримання естерів вищих жирних кислот трансестерифікацією тригліцеридів олій із підвищеним вмістом вільних жирних кислот з подальшою їх адсорбцією із продуктів реакції трансестерифікації на катіонообмінній смолі КУ-2-8.

Список літератури

1. Somnuk K., Smithmaitrie P., Prateepchaikul G. Two-stage continuous process of methyl ester from high free fatty acid mixed crude palm oil using static mixer coupled with high-intensity of ultrasound. *Energy Conversion and Management*. 2013. №7 5. P. 302–310. doi:10.1016/j.enconman.2013.06.033.
2. Zhou X. A Review of Transesterification Catalysts. *Applied and Computational Engineering*. 2025. № 122. P. 61–65. doi:10.54254/2755-2721/2025.19601.
3. Yusuf B. O., Oladepo S. A., Ganiyu S. A. Efficient and Sustainable Biodiesel Production via Transesterification: Catalysts and Operating Conditions. *Catalysts*. 2024. № 14 (9). P. 581. doi:10.3390/catal14090581.
4. Junior C., Lima R., Mendonça C., Nascimento W., Macie, A. Innovative use of ariri coconut oil in the sustainable and rapid production of esters via enzymatic transesterification with ethanol. *Ciência e Natura*. 2025. № 47. e88915. doi:10.5902/2179460X88915.
5. Lee Y., Wu C.-H., Srinivaas M., Li I.-C., Busireddy M. R., Sankar B. D., Pothu R., Baraka, F., Boddula R., Rokhum S. L., Al-Qahtani N., Huang B.-W., Chang-Chien G.-P. Recent Advances in Electrocatalytic Transesterification: Enhancing Biodiesel Synthesis for Sustainable Energy. *International Journal of Energy Research*. 2025. doi:10.1155/er/7887020.
6. Manzato A., Conti F. Lipid Extraction and Transesterification Process for Microalgal Biodiesel. *Environmental and Climate Technologies*. 2025. № 29. P. 742–755. doi:10.2478/rtuect-2025-0049.
7. Asif S., Chuah L., Klemeš J., Ahmed M., Akbar M., Lee K., Fatima Al. Cleaner production of methyl ester from non-edible feedstock by ultrasonic-assisted cavitation system. *Journal of Cleaner Production*. 2017. № 161. P. 1360–1373. doi:10.1016/j.jclepro.2017.02.081.
8. Nurdina R., Kamiya Y., Hatmanto A., Pambudi F., Suyanta S., Nuryono N. Ultrasonic-Assisted Transesterification of Tripalmitin Using Limestone-Derived CaO Catalyst. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*. 2025. № 20. P. 672–682. doi:10.9767/brec.20456.
9. Ahmad A., Mat Rosid S. J., Zulkurnain N., Azid A., Toemen S., Ismail S., Wan Abdullah W., Mat Rosid S. Optimization Efficiency of Calcium Based Catalyst in Coconut Oil Transesterification via Box-Behnken Design. *BIO Web of Conferences*. 2025. № 189. 01023. doi:10.1051/bioconf/202518901023.
10. Běřešová M., Ondrovič T., Kovárová E.P., Hornáček M. Optimization of Heterogeneous Transesterification of Non-Food Sources To Produce Biodiesel. *Catalysis Letters*. 2025. № 155. 302. doi:10.1007/s10562-025-05145-y.

- Melnyk Y., Chernichenko O., Melnyk S., Mahorivska H. Adsorption of oleic acid on AV-17-8 anion exchange resin. *Питання хімії та хімічної технології*. 2024. № 6 (157). P. 4–10. doi:10.32434/0321-4095-2024-157-6-4-10.
- Melnyk Yu., Melnyk S., Palyukh Z., Dzinyak B. Research into transesterification of triglycerides by aliphatic alcohols C2–C4 in the presence of ionites. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 1/6 (94). P. 10–16. doi:10.15587/1729-4061.2018.122938.
- Мельник Ю. Р., Черніченко О. В., Мельник С. Р., Магорівська Г. Я. Адсорбція олеїнової кислоти на іонообмінній смоли КУ-2-8. *Наукові вісті Давіського університету*. 2025. № 28. doi: 10.33216/2222-3428-2024-28-5.
- Manzato A., Conti F. Lipid Extraction and Transesterification Process for Microalgal Biodiesel. *Environmental and Climate Technologies*, 2025, vol. 29, pp. 742–755, doi:10.2478/rtuect-2025-0049.
- Asif S., Chuah L., Klemeš J., Ahmed M., Akbar M., Lee K., Fatima Al. Cleaner production of methyl ester from non-edible feedstock by ultrasonic-assisted cavitation system. *Journal of Cleaner Production*, 2017, vol. 161, pp. 1360–1373, doi:10.1016/j.jclepro.2017.02.081.
- Nurdina R., Kamiya Y., Hatmanto A., Pambudi F., Suyanta S., Nuryono N. Ultrasonic-Assisted Transesterification of Tripalmitin Using Limestone-Derived CaO Catalyst. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 2025, vol. 20, pp. 672–682, doi:10.9767/bcrec.20456.
- Ahmad A., Mat Rosid S. J., Zulkurnain N., Azid A., Toemen S., Ismail S., Wan Abdullah W., Mat Rosid S. Optimization Efficiency of Calcium Based Catalyst in Coconut Oil Transesterification via Box-Behnken Design. *BIO Web of Conferences*, 2025, vol. 189, 01023, doi:10.1051/bioconf/202518901023.
- Béřesová M., Ondrovič T., Kovárová E.P., Horňáček M. Optimization of Heterogeneous Transesterification of Non-Food Sources To Produce Biodiesel. *Catalysis Letters*, 2025, vol. 155, p. 302, doi:10.1007/s10562-025-05145-y.
- Melnyk Y., Chernichenko O., Melnyk S., Mahorivska H. Adsorption of oleic acid on AV-17-8 anion exchange resin. *Pytannia khimii ta khimichnoi tekhnologii*, 2024, vol. 6, no. 157, pp.4–10, doi:10.32434/0321-4095-2024-157-6-4-10.
- Melnyk Yu., Melnyk S., Palyukh Z., Dzinyak B. Research into transesterification of triglycerides by aliphatic alcohols C2–C4 in the presence of ionites. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, vol. 1/6, no.94, pp.10–16, doi:10.15587/1729-4061.2018.122938.
- Melnyk Yu. R., Chernichenko O. V., Melnyk S. R., Mahorivska H. Ya. Adsorbtsiia oleinovoї kysloty na ionoobminnii smoli KU-2-8 [Adsorption of oleic acid on the ion-exchange resin KU-2-8]. *Scientific Bulletin of Dahl University*, 2025, vol. 28, doi: 10.33216/2222-3428-2024-28-5.

References (transliterated)

- Somnuk K., Smithmaitrie P., Prateepchaikul G. Two-stage continuous process of methyl ester from high free fatty acid mixed crude palm oil using static mixer coupled with high-intensity of ultrasound. *Energy Conversion and Management*, 2013, vol. 75, pp. 302–310, doi:10.1016/j.enconman.2013.06.033.
- Zhou X. A Review of Transesterification Catalysts. *Applied and Computational Engineering*, 2025, vol. 122, pp. 61–65, doi:10.54254/2755-2721/2025.19601.
- Yusuf B. O., Oladepo S. A., Ganiyu S. A. Efficient and Sustainable Biodiesel Production via Transesterification: Catalysts and Operating Conditions. *Catalysts*, 2024, vol. 14, no. 9, pp. 581, doi:10.3390/catal14090581.
- Junior C., Lima R., Mendonça C., Nascimento W., Macie, A. Innovative use of ariri coconut oil in the sustainable and rapid production of esters via enzymatic transesterification with ethanol. *Ciência e Natura*, 2025, vol. 47, e88915, doi:10.5902/2179460X88915.
- Lee Y., Wu C.-H., Srinivaas M., Li I.-C., Busireddy M. R., Sankar B. D., Pothu R., Baraka, F., Boddula R., Rokhum S. L., Al-Qahtani N., Huang B.-W., Chang-Chien G.-P. Recent Advances in Electrocatalytic Transesterification: Enhancing Biodiesel Synthesis for Sustainable Energy. *International Journal of Energy Research*, 2025, doi:10.1155/er/7887020.

Відомості про авторів (About authors)

Черніченко Олександр Вадимович – Національний університет «Львівська політехніка», аспірант кафедри технології органічних продуктів; ORCID: 0009-0006-6422-7900, e-mail: oleksandr.v.chernichenko@lpnu.ua

Chernichenko Oleksandr – Lviv Polytechnic National University, Postgraduate at the Department of Organic Products Technology; ORCID: 0009-0006-6422-7900, e-mail: oleksandr.v.chernichenko@lpnu.ua

Мельник Юрій Романович – доктор технічних наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри технології органічних продуктів; ORCID: 0000-0003-0109-5526, e-mail: yurii.r.melnyk@lpnu.ua

Melnyk Yurii – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Lviv Polytechnic National University, Associate Professor at the Department of Organic Products Technology; ORCID: 0000-0003-0109-5526, e-mail: yurii.r.melnyk@lpnu.ua

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Черніченко О. В., Мельник Ю. Р. Трансестерифікація тригліцеридів спиртами C₁–C₃ у присутності аніонообмінної смоли АВ-17-8. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2026. № 1 (27). С. 114–119. doi:10.20998/2413-4295.2026.01.15.

Please cite this article as:

Chernichenko O., Melnyk Yu. Transesterification of triglycerides with C₁–C₃ alcohols catalyzed by anion exchange resin AV-17-8. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: New solutions in modern technology. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2026, no. 1(27), pp. 114–119, doi:10.20998/2413-4295.2026.01.15.

Надійшла (received) 01.02.2026
Прийнята (accepted) 16.03.2026
Опублікована (published) 02.04.2026