

УДК 66.094.942

doi: 10.20998/2413-4295.2022.03.11

## ТРАНСЕСТЕРИФІКАЦІЯ ТРИГЛЦЕРИДІВ ПРОПАН-2-ОЛОМ У ПРИСУТНОСТІ СУЛЬФАТНОЇ КИСЛОТИ

Ю. Р. МЕЛЬНИК<sup>1\*</sup>, С. Р. МЕЛЬНИК<sup>1</sup>, Г. Я. МАГОРІВСЬКА<sup>2</sup>

<sup>1</sup> кафедра технології органічних продуктів, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, УКРАЇНА

<sup>2</sup> кафедра хімічної технології силікатів, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, УКРАЇНА

\* e-mail: yurii.r.melnyk@lpnu.ua

**АНОТАЦІЯ** Досліджено закономірності трансестерифікації тригліцеридів соняшникової олії пропан-2-олом, каталізованої сульфатною кислотою. Визначено вплив вмісту гомогенного кислотного каталізатора та мольного співвідношення тригліцериди соняшникової олії : пропан-2-ол на конверсію реагентів, селективність утворення діізопропілового етеру, кислотне число та колір продуктів реакції за йодною шкалою. Встановлено, що збільшення вмісту сульфатної кислоти в реакційній суміші від 1 до 3 мас. % веде до незначного зростання конверсії тригліцеридів та істотного підвищення конверсії пропан-2-олу. Подальше збільшення вмісту кислотного каталізатора спричиняє зниження конверсії як тригліцеридів, так і спирту. Співставлення отриманих результатів із даними щодо складу продуктів реакції дало змогу зробити висновок, що істотне підвищення конверсії пропан-2-олу при збільшенні вмісту сульфатної кислоти до 3–4 мас. % зумовлене зростанням селективності утворення діізопропілового етеру з 5 % при вмісті кислотного каталізатора 1 мас. % до майже 65 % при вмісті сульфатної кислоти 4 мас. %. Показано, що збільшення вмісту сульфатної кислоти в реакційній суміші також веде до підвищення кольору продуктів реакції за йодною шкалою практично в 5 разів, що також свідчить про перебіг побічних реакцій конденсації та осмолення за участю подвійних зв'язків вищих жирних кислот, які входять до складу тригліцеридів. Встановлено, що зі збільшенням вмісту кислотного каталізатора в реакційній суміші закономірно зростає кислотне число продуктів реакції. Показано, що значення кислотного числа продуктів реакції визначається саме кількістю застосовуваного кислотного каталізатора. Показано, що активність сульфатної кислоти в реакції трансестерифікації тригліцеридів соняшникової олії є дещо нижчою за активність катіоніту КУ-2-8, який за однакових умов забезпечує більш ніж на 15 % вищу конверсію тригліцеридів при нижчому значенні кольору продуктів реакції за йодною шкалою та відсутністю перебігу побічної реакції утворення діізопропілового етеру. Зроблено висновок про ефективність застосування сульфатної кислоти як каталізатора трансестерифікації тригліцеридів пропан-2-олом.

**Ключові слова:** трансестерифікація; соняшникова олія; пропан-2-ол; сульфатна кислота; катіоніт КУ-2-8; естери вищих жирних кислот.

## TRANSESTERIFICATION OF TRIGLYCERIDES WITH PROPAN-2-OL CATALYSED BY SULFURIC ACID

Yu. MELNYK<sup>1</sup>, S. MELNYK<sup>1</sup>, H. MAHORIVSKA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Organic Products Technology, Lviv Polytechnic National University, Lviv, UKRAINE

<sup>2</sup> Department of Chemical Technology of Silicates, Lviv Polytechnic National University, Lviv, UKRAINE

**ABSTRACT** Transesterification of sunflower oil triglycerides with propan-2-ol catalyzed by sulfuric acid has been studied. The effect of the homogeneous acid catalyst content and the triglycerides of sunflower oil : propan-2-ol molar ratio on the reagents conversion, selectivity of diisopropyl ether formation, the acid number and the color of reactions products on the iodine scale was determined. It was established that an increase in the sulfuric acid content from 1 wt. % up to 3 wt. % leads to a slight increase in the triglycerides conversion and a significant increase in the propan-2-ol conversion. A further increase in the acid catalyst content causes a decrease in the conversion of both triglycerides and alcohol. Comparison of the obtained results with the data on the reaction products composition allowed us to conclude that a significant increase in the propan-2-ol conversion with an increase in the sulfuric acid content to 3–4 wt. % due to the increase in the diisopropyl ether selectivity formation from 5% by an acid catalyst content of 1 wt. % to almost 65% by a sulfuric acid content of 4 wt. %. It is shown that an increase in the sulfuric acid content in the reaction mixture also leads to a significant increase in the reaction product's color according to the iodine scale - almost 5 times, which also indicates the course of side condensation reactions with the double bonds of higher fatty acids participation, which are part of triglycerides composition. It is established that the reaction product's acid number regularly increases with an increase in the acid catalyst content in the reaction mixture. It is shown that the reaction products acid number value is determined by the amount of acid catalyst used. It is established that the activity of the sulfuric acid in the sunflower oil triglycerides transesterification reaction is slightly lower than the activity of cation exchange resin KU-2-8. The cation exchange resin under the same conditions provides more than 15% higher triglycerides conversion with a lower reaction product's color on the iodine scale value and the absence of a

*diisopropyl ether formation side reaction. It is concluded that using sulfuric acid as a catalyst for triglyceride transesterification by propan-2-ol is entirely possible.*

**Keywords:** transesterification; sunflower oil; propan-2-ol; sulfuric acid; cation exchange resin KU-2-8; higher fatty acids esters.

## Вступ

Для інтенсифікації процесу трансестерифікації тригліцеридів аліфатичними спиртами використовують як основні, так і кислотні каталізatori. Промислові каталізatori – гідроксиди і метилати натрію чи калію – мають істотний недолік: можливість перебігу реакції омилення тригліцеридів, що негативно впливає на ефективність стадії розділення продуктів трансестерифікації. Одним з напрямків вирішення вказаної проблеми є пошук ефективних кислотних каталізatori реакції трансестерифікації, які не будуть сприяти омиленню тригліцеридів [1,2].

У роботі [2] показано, що застосування сульфатної кислоти як каталізатора трансестерифікації тригліцеридів метанолом дає змогу за температури до 60 °С, мольного співвідношення тригліцериди : спирт – 1 : (3,3–30) та вмісту каталізатора 1–5 % досягнути виходу метилових естерів 85–95 %.

Результати досліджень трансестерифікації рисової олії метанолом у присутності кислотних каталізatori різної природи, зокрема й сульфатної кислоти наведено в роботі [3]. Авторами показано, що за мольного співвідношення тригліцериди : метанол за 4 год досягається вихід метилових естерів вищих жирних кислот майже 70 %.

Реакцію трансестерифікації неочищеної пальмової олії метанолом за умови каталізу сульфатною, метансульфоною та хлоридною кислотами досліджено в дослідженні [4]. Хоча авторами основну увагу приділено реакції естерифікації присутніх у неочищеній пальмовій олії вільних кислот, у роботі показано, що за 60 °С та мольного співвідношення тригліцериди : метанол 1 : (5–20) у присутності кислотних каталізatori також відбувається реакція трансестерифікації тригліцеридів.

У роботі [5] досліджено трансестерифікацію тригліцеридів соєвої олії метанолом у присутності сульфатної, хлоридної, мурашиної, оцтової та нітратної кислот. Авторами показано, що за температури реакції 100 °С, тиску 0,35 МПа та мольного співвідношення тригліцериди соєвої олії : метанол – 1 : 9 каталітичну активність виявляє лише сульфатна кислота, у присутності якої за 8 год досягається вихід метилових естерів вищих жирних кислот близько 99 %.

Існує значна кількість досліджень, в яких запропоновано використовувати кислотні каталізatori загалом, і сульфатну кислоту зокрема, в двостадійному процесі одержання метилових естерів вищих жирних кислот [6]. Використання кислотних каталізatori дає змогу здійснювати переробку низькоякісної сировини – відпрацьованої або

неочищеної олії з високим вмістом вільних жирних кислот. Показано, що сульфатна кислота дає змогу ефективно здійснювати першу стадію процесу – естерифікацію присутніх в олійній сировині кислот. Встановлено, що за мольного співвідношення тригліцериди : метанол – 1 : 9, вмісту сульфатної кислоти 1 мас. % та температури 333 К за 7,5 хв досягається конверсія кислот понад 97 %.

У дослідженні [7] запропоновано використовувати сульфатну кислоту, нанесену на кремнезем. Застосування такого каталізатора дає змогу за температури 30–65 °С та мольного співвідношення тригліцериди : метанол до 1 : 20 переробляти неочищену олію ятрофи з вмістом вільних жирних кислот від 6,5 % до 45,5 % та за 30–180 хв досягати конверсії кислот 98 %.

Слід зауважити, що переважна більшість досліджень спрямована на застосування в реакції трансестерифікації метанолу [2,8].

Водночас, важливе значення в хімічній промисловості також мають естери вищих жирних кислот та спиртів C<sub>2</sub>–C<sub>5</sub>, наприклад ізопропілові естери, які одержують трансестерифікацією метилових естерів вищих жирних кислот пропан-2-олом і застосовують як пластифікатори та емоменти [9]. Тому визначення закономірностей трансестерифікації тригліцеридів пропан-2-олом є актуальним.

## Мета роботи

Метою роботи було дослідження закономірностей трансестерифікації тригліцеридів пропан-2-олом, каталізованої сульфатною кислотою, та встановлення впливу концентрації каталізатора і мольного співвідношення реагентів на конверсію тригліцеридів та селективність утворення продуктів реакції трансестерифікації.

## Виклад основного матеріалу

Як джерело тригліцеридів використовували соняшникову олію (ДСТУ 4492:2005 Олія соняшникова. Технічні умови). Трансестерифікацію тригліцеридів здійснювали пропан-2-олом (марки «х.ч.»). Як каталізатор застосовували сульфатну кислоту (ДСТУ ГОСТ 2184:2018 Кислота сірчана технічна. Технічні умови), а також катіоніт КУ-2-8 у Н-формі та з іммобілізованими іонами Cu<sup>2+</sup>.

Реакцію трансестерифікації тригліцеридів соняшникової олії пропан-2-олом здійснювали за температури 353 К, мольного співвідношення тригліцериди : пропан-2-ол – 1 : (3,7–4,5) та вмісту каталізатора – сульфатної кислоти – 1–4 мас. %.

Трансестерифікацію тригліцеридів соняшникової олії пропан-2-олом вели в лабораторній

установці, яка складалася з круглодонної колби, обладнаної зворотним холодильником та термометром. Реагенти у заданому мольному співвідношенні завантажували в колбу, нагрівали реакційну суміш до температури реакції та вносили каталізатор – сульфатну кислоту. Для нагрівання реакційної суміші використовували баню, заповнену силіконовою оливою та обладнану магнітною мішалкою. Через задані проміжки часу з реакційної суміші відбирали проби, в яких хроматографічно визначали вміст пропан-2-олу та діізопропілового етеру. У продуктах реакції визначали кислотне число [10] та колір за йодною шкалою при довжині хвилі 440 нм.

Вміст пропан-2-олу та діізопропілового етеру в пробах реакційної суміші визначали за допомогою газорідинного хроматографа ЛХМ-80 з детектором за теплопровідністю. Для хроматографічного аналізу використовували колонку довжиною 1 м і діаметром 3 мм. Колонку заповнювали фазою Silicone SE30, нанесеною на носій Chromaton N-AW у кількості 5 %. Витрата газу-носія – гелію – становила 3 дм<sup>3</sup>/год, сила струму на детекторі – 120 мА, об'єм проби – 2 мкл. Температура випарника становила 483 К, колонки – 353 К, детектора – 443 К. Концентрацію пропан-2-олу визначали методом абсолютного калібрування [11].

Конверсію пропан-2-олу і тригліцеридів соняшникової олії розраховували за методикою, наведено в дослідженні [12].

Селективність утворення діізопропілового етеру розраховували за формулою

$$\Phi_{ET}^{СП} = \frac{2n_{ET,i}}{n_{СП,0} - n_{СП,i}} \cdot 100, \quad (1)$$

де  $n_{ET,i}$  – визначена хроматографічно кількість утвореного етеру в поточній пробі, моль;  $n_{СП,0}$  – початкова кількість пропан-2-олу, завантажена у реактор, моль;  $n_{СП,i}$  – визначена хроматографічно кількість пропан-2-олу в поточній пробі, моль.

Перебіг трансестерифікації соняшникової олії пропан-2-олом у присутності сульфатної кислоти характеризували конверсією тригліцеридів соняшникової олії та селективністю утворення діізопропілового етеру, а також кислотним числом та кольором продуктів реакції за йодною шкалою.

За результатами досліджень встановлено, що зі збільшенням вмісту каталізатора – сульфатної кислоти – від 1 до 3 мас. % спостерігається незначне підвищення конверсії тригліцеридів – від 65 до 71 %. Подальше підвищення вмісту сульфатної кислоти в реакційній суміші до 4 мас. % веде до різкого зниження конверсії тригліцеридів (рис. 1). Тривалість реакції становила 5 год.

Характер залежності конверсії пропан-2-олу від вмісту каталізатора дещо інший. Зі збільшенням вмісту кислоти від 2 до 3 мас. % спостерігається різке підвищення конверсії спирту – майже до 100 %, а

подальше збільшення вмісту каталізатора веде до незначного зниження конверсії пропан-2-олу (рис. 1). Аналіз складу продуктів показав, що навіть за мінімального дослідженого вмісту сульфатної кислоти в реакційній суміші – 1 мас. % – спостерігається утворення побічного продукту – діізопропілового етеру. Селективність його утворення різко зростає зі збільшенням вмісту каталізатора в реакційній суміші.

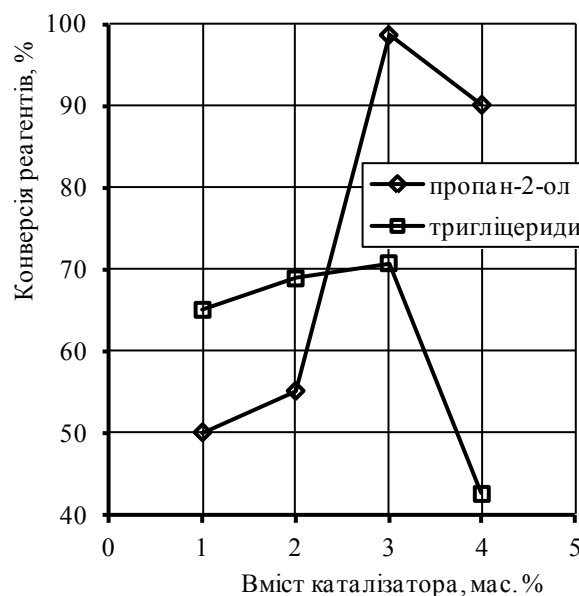


Рис. 1 – Залежність конверсії тригліцеридів і пропан-2-олу від масового вмісту каталізатора – сульфатної кислоти – в реакційній суміші. Температура реакції – 353 К, мольне співвідношення тригліцериди соняшникової олії : пропан-2-ол – 1 : 4, тривалість реакції 5 год

Цілком закономірно і практично лінійно зі збільшенням вмісту сульфатної кислоти в реакційній суміші зростає кислотне число продуктів реакції (рис. 2).

Високе значення кислотного числа реакційної суміші, яке, залежно від вмісту сульфатної кислоти, знаходиться у межах 6–23 мг КОН/г продуктів реакції, дає змогу зробити висновок про необхідність нейтралізації реакційної суміші після завершення реакції та відмивання продуктів нейтралізації.

Результати досліджень показують, що колір продуктів реакції за йодною шкалою навіть за низького вмісту сульфатної кислоти в реакційній суміші є істотно вищий, ніж при використанні як каталізатора катіоніту КУ-2-8 у Н-формі або з іммобілізованими іонами металів [13]. Встановлено, що зростання вмісту каталізатора – сульфатної кислоти – понад 2 мас. % веде до збільшення інтенсивності забарвлення продуктів реакції за йодною шкалою майже у 5 разів (рис. 3).

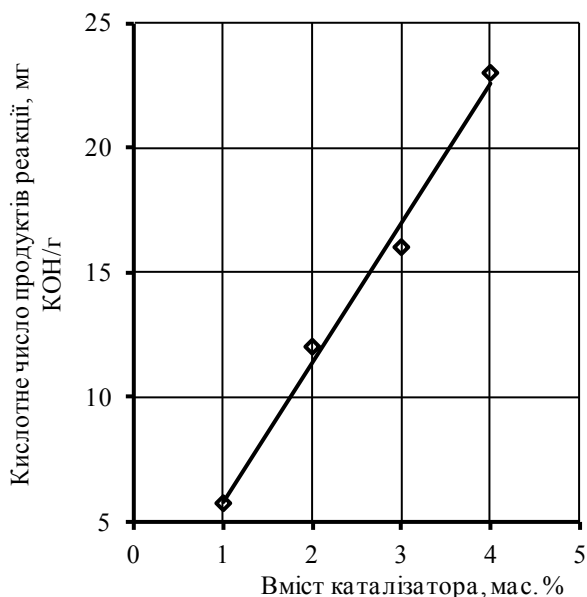


Рис. 2 – Залежність кислотного числа продуктів реакції від масового вмісту сульфатної кислоти в реакційній суміші. Температура реакції – 353 К, мольне співвідношення тригліцериди соняшникової олії : пропан-2-ол – 1 : 4, тривалість реакції 5 год

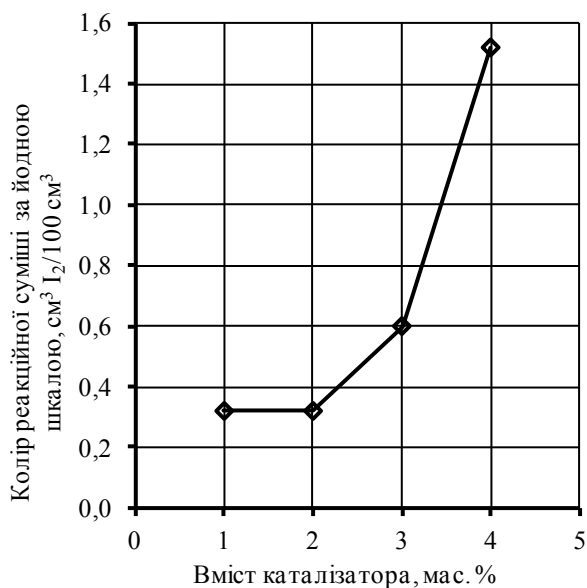


Рис. 3 – Залежність кольору продуктів реакції за йодною шкалою від масового вмісту сульфатної кислоти в реакційній суміші. Температура реакції – 353 К, мольне співвідношення тригліцериди соняшникової олії : пропан-2-ол – 1 : 4, тривалість реакції 5 год

Зміна мольного співвідношення тригліцериди соняшникової олії : пропан-2-ол в межах від 1 : 3,7 до 1 : 4,5 незначно впливає на показники реакції трансестерифікації (табл. 1).

Збільшення мольного співвідношення реагентів від 1 : 3,7 до 1 : 4,5 закономірно веде до підвищення конверсії тригліцеридів до 74,3 % та деякого зниження селективності утворення дізопропілового етеру. Кислотне число та колір продуктів реакції за йодною шкалою зі збільшенням мольного надлишку спирту залишаються практично незмінними.

Результати трансестерифікації тригліцеридів соняшникової олії пропан-2-олом у присутності катіоніту КУ-2-8 у Н-формі та з іммобілізованими іонами міді, які були досліджені раніше як каталізатори трансестерифікації тригліцеридів [14], свідчать про нижчу активність сульфатної кислоти, як каталізатора трансестерифікації тригліцеридів порівняно з катіонітом у Н-формі (табл. 2).

Таблиця 1 – Вплив мольного співвідношення реагентів на показники реакції трансестерифікації тригліцеридів соняшникової олії пропан-2-олом. Температура реакції – 353 К, вміст каталізатора – 2 мас. %, тривалість реакції 5 год, каталізатор – сульфатна кислота

Мольне співвідношення тригліцериди : пропан-2-ол	Конверсія тригліцеридів, %	Селективність за дізопропіловим етером, %	КЧ продуктів реакції, мг КОН/г	Колір продуктів реакції за ЙІШ, см³ I₂/100 см³
3,7 : 1	64,2	10,7	20,1	0,35
4,0 : 1	68,8	10,0	19,4	0,32
4,5 : 1	74,3	9,2	19,4	0,31

Таблиця 2 – Вплив виду каталізатора на показники реакції трансестерифікації тригліцеридів соняшникової олії пропан-2-олом. Температура реакції – 353 К, мольне співвідношення тригліцериди соняшникової олії : пропан-2-ол – 1 : 4, вміст каталізатора – 2 мас. %, тривалість реакції 5 год

Каталізатор	Конверсія тригліцеридів соняшникової олії, %	КЧ продуктів реакції, мг КОН/г	Колір реакційної суміші за ЙІШ, см³ I₂/100 см³
H₂SO₄	68,8	19,0	0,32
КУ-2-8/H⁺	85,1	0,5	0,12
КУ-2-8/Cu²⁺	55,6	0,5	0,15

Слід зазначити, що характерною особливістю застосування сульфатної кислоти як каталізатора трансестерифікації порівняно з катіонітом є більш ніж

у 2 рази вище значення кольору продуктів реакції та майже в 40 разів вище значення кислотного числа реакційної суміші (табл. 1).

### Обговорення результатів

Отримані результати залежності конверсії реагентів від вмісту каталізатора – сульфатної кислоти – у реакційній суміші (рис. 1) свідчать про перебіг побічних реакцій за участю пропан-2-олу, частка яких істотно зростає зі збільшенням вмісту каталізатора.

Відомо, що в присутності сульфатної кислоти відбувається міжмолекулярна дегідратація бутан-1-олу з утворенням дибутилового етеру [15]. Нами встановлено, що із застосуванням як каталізатора трансестерифікації тригліцеридів соняшникової олії пропан-2-олом сульфатної кислоти відбувається побічна реакція утворення діізопропілового етеру. Показано, що зі збільшенням вмісту кислотного каталізатора в реакційній суміші селективність утворення діізопропілового етеру різко зростає (рис. 4).

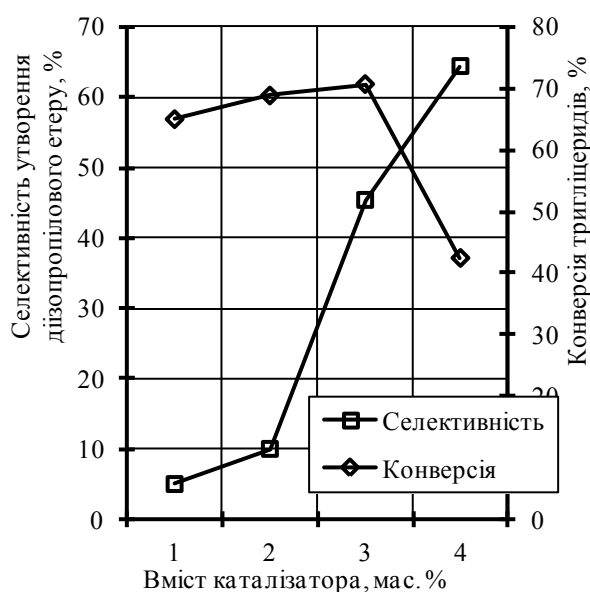


Рис. 4 – Залежність селективності утворення діізопропілового етеру від масового вмісту сульфатної кислоти в реакційній суміші. Температура реакції – 353 К, мольне співвідношення тригліцериди соняшникової олії : пропан-2-ол – 1 : 4, тривалість реакції 5 год

За результатами досліджень встановлено, що при вмісті сульфатної кислоти в реакційній суміші до 2 мас. % селективність утворення діізопропілового етеру не перевищує 10 %. Подальше збільшення вмісту гомогенного кислотного каталізатора спричиняє різке збільшення селективності утворення етеру до майже 65 % і, як наслідок, зниження

конверсії тригліцеридів і, відповідно, виходу естерів вищих жирних кислот. Очевидно, зниження конверсії тригліцеридів, яке спостерігається при вмісті каталізатора 4 мас. %, зумовлене тим, що значна кількість пропан-2-олу витрачається на побічну реакцію утворення діізопропілового етеру, що веде до істотного зменшення мольного співвідношення тригліцериди : пропан-2-ол. Таким чином, застосування високого вмісту кислотного каталізатора з метою збільшення швидкості трансестерифікації є недоцільним і спричиняє істотне підвищення селективності утворення діізопропілового етеру.

Ще одним свідченням інтенсивного перебігу побічних реакцій зі збільшенням вмісту кислоти-каталізатора є підвищення інтенсивності забарвлення реакційної суміші за йодною шкалою. Різке її збільшення з підвищенням вмісту сульфатної кислоти у реакційній суміші до 4 мас. % очевидно зумовлене перебігом реакцій конденсації та осмолення за участю подвійних зв'язків вищих жирних кислот, які входять до складу тригліцеридів.

Результати досліджень свідчать, що значення кислотного числа продуктів реакції, що зростає практично лінійно зі збільшенням її вмісту в реакційній суміші зумовлене саме присутністю кислотного каталізатора. Крім того, незначне зниження кислотного числа продуктів реакції порівняно з його початковим значенням може свідчити про естерифікацію пропан-2-олом навіть тієї невеликої кількості вільних жирних кислот присутніх в соняшковій олії (кислотне число 0,6 мг КОН/г олії).

### Висновки

Одержані результати досліджень показують, що сульфатна кислота виявляє достатньо високу активність як каталізатор трансестерифікації тригліцеридів пропан-2-олом і дає змогу за температури 353 К і мольного співвідношення тригліцериди : спирт – 1 : 4 досягнути конверсії тригліцеридів близько 70 %. Проте зі збільшенням вмісту сульфатної кислоти в реакційній суміші спочатку спостерігається незначне підвищення конверсії тригліцеридів, а за вмісту кислоти понад 3 мас. % відбувається різке зниження конверсії тригліцеридів до близько 40 % з одночасним істотним підвищенням конверсії пропан-2-олу, яке зумовлене зростанням частки побічних реакцій. Аналіз складу продуктів реакції дає змогу зробити висновок, що за вмісту сульфатної кислоти 4 мас. % селективність утворення діізопропілового етеру досягає майже 65 %. Зміна кольору реакційної суміші за йодною шкалою зі збільшенням вмісту кислотного каталізатора також свідчить про значну частку побічних реакцій конденсації та осмолення за участю

подвійних зв'язків вищих жирних кислот, що входять до складу тригліцеридів.

Загалом, отримані результати дають змогу зробити висновок про можливість застосування сульфатної кислоти як дешевого каталізатора трансестерифікації тригліцеридів пропан-2-олом за умови здійснення додаткових досліджень та встановлення оптимальних умов її застосування.

#### Список літератури

1. Ferreira B. A., Cardoso L. A., da Silva J. M. Tin-Catalyzed Esterification and Transesterification Reactions: A Review. *ISRN Renewable Energy*. 2012. Iss. 4. doi: 10.5402/2012/142857.
2. Canakci M., Van Gerpen J. Biodiesel Production via Acid Catalysis. *Transactions of the ASAE*. 1999. № 49 (5). P. 1203–1210. doi: 10.13031/2013.13285.
3. Einloft S., Magalhães T. O., Donato A., Dullius J., Ligabue R. Biodiesel from Rice Bran Oil: Transesterification by Tin Compounds. *Energy Fuels*. 2008. № 22. P.671–674. doi: 10.1021/ef700510a.
4. Hayyan A., Mjalli F. S., Hayyan M., Alnashef I. M., Mirghani M. E. S. Utilizing ultrasonic energy for reduction of free fatty acids in crude palm oil. *African Journal of Biotechnology*. 2012. № 11 (61). P. 12510–12517. doi: 10.5897/AJB12.1709.
5. Goff M. J., Bauer N. S., Lopes S., Sutterlin W. R., Suppes G. J. Acid-Catalyzed Alcoholysis of Soybean Oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 2004. Vol. 81. № 4. P. 415–420. doi: 10.1007/s11746-004-0915-6.
6. Lin C., Hsiao M. Optimization of Biodiesel Production from Waste Vegetable Oil Assisted by Co-Solvent and Microwave Using a Two-Step Process. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*. 2013. № 3. P. 1–6. doi: 10.4236/jsbs.2013.31001.
7. Mushtaq M., Tana I. M., Sagira M., Tahirb M. S., Pervaizc M. A novel hybrid catalyst for the esterification of high FFA in Jatropha oil for biodiesel production. *Grasas y Aceites*. 2016. doi: 10.3989/gya.0216161.
8. Owolabi R. U., Adejumo A. L., Aderibigbe A. F. Biodiesel: Fuel for the Future. *International Journal of Energy Engineering*. 2012. Iss. 2 (5). P. 223–231. doi: 10.5923/j.ijee.20120205.06.
9. KLK OLEO. Oleochemical Manufacturer & Supplier. URL: <https://www.klkoleo.com/> (дата звернення: 25.08.2022).
10. Methodology for Lipids. URL: [http://www.biocyclopedia.com/index/plant\\_protocols/lipids/Estimation\\_of\\_free\\_fatty\\_acids.php/](http://www.biocyclopedia.com/index/plant_protocols/lipids/Estimation_of_free_fatty_acids.php/) (дата звернення: 20.08.2022).
11. Melnyk Yu., Melnyk S., Palyukh Z., Dzinyak B. Research into transesterification of triglycerides by aliphatic alcohols C<sub>2</sub>–C<sub>4</sub> 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.
12. Мельник Ю. Р., Мельник С. Р., Магорівська Г. Я. Трансестерифікація тригліцеридів рослинних олій головною фракцією етилового спирту. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 1 (7). С. 72–79. doi: 10.20998/2413-4295.2021.01.11.

13. Палюх З. Ю., Мельник Ю. Р., Мельник С. Р. Вплив параметрів процесу на алкохоліз соняшникової олії етиловим спиртом. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. 2016. № 12 (1184). С. 163–168. doi: 10.20998/2413-4295.2016.12.24.
14. Мельник Ю. Р., Мельник С. Р., Палюх З. Ю., Надала О. С. Переробка рослинних олій шляхом їх алкохолізу ізопропіловим спиртом. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2015. Вип. 25.3. С. 135–139.
15. Liao W., Lou W., Jin W., Li S., Mao H., Bai Y. An Experimental Modification to the Preparation of di-n-butyl ether from 1-butanol for the Undergraduate Teaching Course of Organic Laboratory. *World Journal of Chemical Education*. 2022. 10 (1). P. 46–50. doi: 10.12691/wjce-10-1-6.

#### References (transliterated)

1. Ferreira B. A., Cardoso L. A., da Silva J. M. Tin-Catalyzed Esterification and Transesterification Reactions: A Review. *ISRN Renewable Energy*, 2012, Iss. 4, doi: 10.5402/2012/142857.
2. Canakci M., Van Gerpen J. Biodiesel Production via Acid Catalysis. *Transactions of the ASAE*, 1999, no. 49 (5), pp. 1203–1210, doi: 10.13031/2013.13285.
3. Einloft S., Magalhães T. O., Donato A., Dullius J., Ligabue R. Biodiesel from Rice Bran Oil: Transesterification by Tin Compounds. *Energy Fuels*, 2008, no. 22, pp. 671–674, doi: 10.1021/ef700510a.
4. Hayyan A., Mjalli F. S., Hayyan M., Alnashef I. M., Mirghani M. E. S. Utilizing ultrasonic energy for reduction of free fatty acids in crude palm oil. *African Journal of Biotechnology*, 2012, no. 11 (61), pp. 12510–12517, doi: 10.5897/AJB12.1709.
5. Goff M. J., Bauer N. S., Lopes S., Sutterlin W. R., Suppes G. J. Acid-Catalyzed Alcoholysis of Soybean Oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2004, Vol. 81, no. 4, pp. 415–420, doi: 10.1007/s11746-004-0915-6.
6. Lin C., Hsiao M. Optimization of Biodiesel Production from Waste Vegetable Oil Assisted by Co-Solvent and Microwave Using a Two-Step Process. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 2013, no. 3, pp. 1–6, doi: 10.4236/jsbs.2013.31001.
7. Mushtaq M., Tana I. M., Sagira M., Tahirb M. S., Pervaizc M. A novel hybrid catalyst for the esterification of high FFA in Jatropha oil for biodiesel production. *Grasas y Aceites*, 2016, doi: 10.3989/gya.0216161.
8. Owolabi R. U., Adejumo A. L., Aderibigbe A. F. Biodiesel: Fuel for the Future. *International Journal of Energy Engineering*, 2012, 2 (5), pp. 223–231, doi: 10.5923/j.ijee.20120205.06.
9. KLK OLEO. Oleochemical Manufacturer & Supplier. Available at: <https://www.klkoleo.com/> (accessed: 25.08.2022).
10. Methodology for Lipids. Available at: [http://www.biocyclopedia.com/index/plant\\_protocols/lipids/Estimation\\_of\\_free\\_fatty\\_acids.php/](http://www.biocyclopedia.com/index/plant_protocols/lipids/Estimation_of_free_fatty_acids.php/) (accessed 20.08.2022).
11. Melnyk Yu., Melnyk S., Palyukh Z., Dzinyak B. Research into transesterification of triglycerides by aliphatic alcohols C<sub>2</sub>–C<sub>4</sub> in the presence of ionites. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*,

- 2018, no. 1/6 (94), pp. 10–16, doi: 10.15587/1729-4061.2018.122938.
12. Melnyk Yu., Melnyk S., Mahorivska H. Transesterification of vegetable oils' trigly cerides with the head fraction of ethylalcohol. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 1 (7), pp. 72–79, doi: 10.20998/2413-4295.2021.01.11.
13. Paliukh Z. Iu., Melnyk Yu. R., Melnyk S. R. Vplyv parametriv protsesu na alkoholiz soniashnykovoї oliї etylovym spyrtom [Influence of process parameters on the alcoholysis of sunflower oil with ethyl alcohol]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, no.12 (1184), pp. 163–168, doi: 10.20998/2413-4295.2016.12.24.
14. Melnyk Yu. R., Melnyk S. R., Paliukh Z. Yu., Nadala O. S. Pererobka roslynnykh oliї shliakhom yikh alkoholizu izopropilovym spyrtom [Processing of vegetable oils by their alcoholysis with isopropyl alcohol]. *Bulletin of NLTU of Ukraine*, 2015, Iss. 25.3, pp. 135–139.
15. Liao W., Lou W., Jin W., Li S., Mao H., Bai Y. An Experimental Modification to the Preparation of di-n-butyl ether from 1-butanol for the Undergraduate Teaching Course of Organic Laboratory. *World Journal of Chemical Education*, 2022, 10 (1), pp. 46–50, doi: 10.12691/wjce-10-1-6.

### Відомості про авторів (About authors)

**Мельник Юрій Романович** – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри технології органічних продуктів, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0109-5526>, e-mail: [yurii.r.melnyk@lpnu.ua](mailto:yurii.r.melnyk@lpnu.ua).

**Melnyk Yurii** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Organic Products Technology, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0109-5526>, e-mail: [yurii.r.melnyk@lpnu.ua](mailto:yurii.r.melnyk@lpnu.ua).

**Мельник Степан Романович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології органічних продуктів; Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0629-9723>, e-mail: [stepan.r.melnyk@lpnu.ua](mailto:stepan.r.melnyk@lpnu.ua).

**Melnyk Stepan** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Organic Products Technology; Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0629-9723>, e-mail: [stepan.r.melnyk@lpnu.ua](mailto:stepan.r.melnyk@lpnu.ua).

**Магорівська Галина Ярославівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри хімічної технології силікатів; Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3609-7970>, e-mail: [halyna.y.mahorivska@lpnu.ua](mailto:halyna.y.mahorivska@lpnu.ua).

**Mahorivska Halyna** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Chemical Technology of Silicate Materials; Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3609-7970>, e-mail: [halyna.y.mahorivska@lpnu.ua](mailto:halyna.y.mahorivska@lpnu.ua).

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Мельник Ю. Р., Мельник С. Р., Магорівська Г. Я. Трансестерифікація тригліцеридів пропан-2-олом у присутності сульфатної кислоти. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 3 (13). С. 74-80. doi:10.20998/2413-4295.2022.03.11.

*Please cite this article as:*

Melnyk Yu., Melnyk S., Mahorivska H. Transesterification of triglycerides with propan-2-ol catalyzed by sulfuric acid. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 3 (13), pp. 74–80, doi:10.20998/2413-4295.2022.03.11.

*Надійшла (received) 30.08.2022*