

О. М. Близнюк, д. техн. н., професор, О. І. Осецький, д. ф.-м. н., професор,
В. В. Мінухін, д. м. н., професор, А. П. Белінська, к. техн. н., доцент,
Н. Ю. Масалітіна, к. техн. н., доцент, О. О. Варанкіна, к. техн. н., доцент,
І. А. Бєлих, к. біол. н., доцент, Т. В. Школьнікова, к. техн. н., доцент

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ БІОТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПЕРЕЕТЕРИФІКАЦІЇ ЖИРОВИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ *LIPOZYME TL IM*

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

Ключові слова: біотехнологічна переетерифікація, моделювання та оптимізація, іммобілізований ферментний препарат, тривалість переетерифікації, показники якості переетерифікованого жиру.

Вступ

Основний напрям модифікації рослинних олій шляхом підвищення харчової цінності пов'язаний із застосуванням ферментативного каталізу, а саме реакції переетерифікації. Ферментативна переетерифікація дозволяє реалізовувати глобальну перебудову олійножирової промисловості, замінивши існуючий метод гідрогенізації рослинних олій. Переетерифікація є перспективною технологією отримання спеціальних жирів, призначених для кондитерської, хлібопекарської, молочної та інших галузей харчової промисловості [1, 2]. Ферментативні властивості ліпаз як гідролітичних ферментів, так і ферментів, що каталізують реакцію переетерифікації, активно досліджуються. Використання ліпаз з різним типом специфічності дає можливість здійснити процес спрямованої переетерифікації. Крім цього, метод є безпечним, екологічно чистим, не призводить до накопичення в жировій системі транс-ізомерів і практично безвідходний [3]. Однак під час реалізації даного методу виникають певні труднощі, пов'язані зі специфічною процесу. У порівнянні з більшістю інших промислових ферментативних процесів переетерифікація має особливість: присутність двофазної реакційної системи. В такій системі субстрат і продукт ферментативної реакції розташовані в рідкій фазі, яка не змішується з водою, а фермент є активним на поверхні розділу фаз. Крім того, до технологічних аспектів належать суттєва витрата ферментного препарату за умови недостатньої раціоналізації технології; використання здатності гідролітичного ферменту каталізувати реакцію, що є зворотною властивий йому в природі реакції, тощо [3, 4].

У зв'язку з широкими можливостями застосування ферментних препаратів ліпаз важливими завданнями є підвищення їхньої ферментативної активності та зниження витрати ферментних препаратів [3, 5]. Ці завдання можна вирішити шляхом використання моделювання та оптимізації біотехнологічної переетерифікації задля підвищення каталітичної активності та термостабільності препарату. Удосконалення технології дозволить зменшити обсяги відходів виробництва, раціоналізувати режими переробки, обґрунтовано використовувати наявні матеріальні ресурси. Таким чином, з метою отримання безпечної жирової продукції регульованого складу високої харчової та біологічної цінності, раціоналізації технологічного процесу, зменшення кількості відходів олійножирового виробництва є доцільним удосконалити технологію біотехнологічної переетерифікації. Впровадження в технологічний процес результатів такого досліджен-

ня є необхідним, оскільки наявна потреба у високоякісних спеціальних жирах для виробництва харчової продукції.

Дослідження існуючих рішень проблеми

Принцип, покладений в основу усіх методів визначення активності ферменту, полягає у реєстрації швидкості втрат субстрату чи швидкості біосинтезу продуктів реакції. Особливістю ферментативних реакцій є наявність залежності швидкості ферментативної реакції від температури в досить вузькому інтервалі температур, що характеризується так званім температурним оптимумом реакції [6].

В роботі [7] апробовано можливість активації ферментного препарату Амілоризин П10х (продуцент – *Aspeigillus oryzae*) з допомогою акустичного впливу звуку певної частоти діапазону 20–20000 Гц. Встановлено, що акустична обробка здатна як знижувати, і підвищувати амілолітичну активність ферментного препарату. Але залишається невирішеним питання негативних наслідків такого акустичного впливу на здоров'я персоналу, що обслуговує виробництво. Відомий спосіб активації іммобілізованого гетерогенного ферментного препарату (продуцент – *Geobacillus stearothermophilus* G3, носій – амінований силікагель) [8]. Показано високу стабільність біокатализатора у реакції за обґрунтованих оптимальних умов: через 480 годин експлуатації (20 циклів) зберігалось понад 50 % від його початкової активності. Але відсутні дані щодо активації даного ферментного препарату під час реакції міжмолекулярної переетерифікації. У дослідженні [9] оцінено ефект від активації ферментного препарату (продуцент – *Candida antarctica*, носій – хітозан). Проведено активацію хітозану як носію за допомогою дивінілсульфону за різних значень рН. Показано, що отримані результати активації є кращими, ніж ті, що отримані під час використання глутарового альдегіду як реагенту, що активує носій – хітозан. Недоліком дослідження є використання хімічних реагентів, які не є бажаними для використання у виробництві харчових продуктів. Відомий спосіб [10] активації фосфорорганічної гідролази (продуцент – *Flavobacterium*, носій – модифікована епоксидною смолою целюлоза). Активацію було проведено двома різними методами з використанням 1,4-бутандіолдигліцидилового ефіру і 1,1'-карбонілдіімідазолу. Недоліком дослідження є висока чутливість 1,1'-карбонілдіімідазолу до вологи, що утруднює його застосування в біокаталізі. Що стосується бутандіолдигліцидилового ефіру, то цей реагент має помірну токсичність для людини. Варіантом подолання відповідних недоліків може бути додаткові стадії очищення продукції, але це є недоцільним з економічної точки зору. Перспективним є дослідження [11], де було розглянуто вплив ряду сполук на активність ферментного препарату панкреатичної ліпази (продуцент – клітини підшлункової залози крупної рогатої худоби). Встановлено, що рівень впливу неорганічних сполук на швидкість реакції залежить від ступеня емульгування субстрату. Але серед результатів дослідження відсутні дані щодо впливу означених активаторів на іммобілізовану форму ліполітичних ферментних препаратів. В роботі [12] обґрунтовано необхідність присутності води у складі іммобілізованого ферментного препарату *Lipozyme RM IM* (продуцент ферментного препарату – *Rhizomucor miehei*, носій – іонообмінна смола) під час переетерифікації між кокосовою олією і високоолеїною рапсовою олією. Але відсутні дані щодо активації ліполітичних ферментних препаратів, що іммобілізовані на інших носіях, зокрема на силікагелі.

Аналіз профільних наукових публікації дозволяє стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого активації ферментного препарату *Lipozyme TL IM* (продуцент ферментного препарату – *Thermomyces lanuginosus*, носій –

силікагель). Ферментний препарат широко використовується в біотехнологічній переетерифікації жирових систем і представляє собою суміш гідролітичних ферментів, переважно ліпаз, іммобілізованих на силікагелі. Силікагель як носій, на відміну від ряду інших аналогів, має утримувати певну кількість води для підтримки активності ліпази на поверхні розподілу фаз [13]. Але існує певний брак даних щодо моделювання та оптимізації способів активації подібних ферментних препаратів або ферментів, іммобілізованих на силікагелі. Зважаючи на це, є актуальним дослідження впливу на ефективність біотехнологічної переетерифікації жирових систем за допомогою ліпаз, іммобілізованих на силікагелі, попереднього зволоження водними розчинами з різною величиною рН. Відповідно, важливим є обґрунтування раціональних значень рН водного розчину та величини попереднього зволоження іммобілізованого на силікагелі ферментного препарату. Це дозволить підвищити ефективність процесу біотехнологічної переетерифікації широкого спектру жирових систем.

Мета та основні задачі дослідження

Метою дослідження є моделювання та оптимізація біотехнологічної переетерифікації жирових систем з використанням іммобілізованого ферментного препарату. Це дасть можливість мінімізації тривалості процесу переетерифікації з одночасним отриманням високоякісного переетерифікованого жирового продукту.

Для досягнення поставленої мети було вирішено такі задачі:

- визначити жирнокислотний склад жирової сировини для біотехнологічної переетерифікації;
- дослідити залежність ефективності біотехнологічної переетерифікації від попереднього зволоження іммобілізованого ферментного препарату та рН водного розчину;
- визначити жирнокислотний склад переетерифікованого жирового продукту, отриманого за удосконаленою технологією, порівняти його з аналогом, виготовленим за традиційною технологією.

Матеріали та методи досліджень

Під час досліджень використано такі матеріали та реактиви:

- іммобілізований ферментний препарат *Lipozyme TL IM*, що представляє собою іммобілізовану на силікагелі ліпазу *Thermomyces lanuginosus* (виробництво *Novozymes A/S*, Данія), згідно з CAS 9001-62-1;
- пальмовий стеарин рафінований, вибілений та дезодорований (виробництво Малайзія), згідно з ДСТУ 4439/CAS 91079-14-0;
- кокосова олія рафінована, вибілена та дезодорована (виробництво Малайзія), згідно з ДСТУ 4562/CAS 8001-31-8;
- соєва олія рафінована, вибілена та дезодорована (виробництво Україна), згідно з ДСТУ 4534/CAS 8001-22-7.

Процес біотехнологічної переетерифікації проводився під вакуумом за температури 70 ± 1 °C під час перемішування зі швидкістю 500 обертів за хвилину. Вміст ферментного препарату *Lipozyme TL IM* у реакційній суміші становив 10 % від маси жирової системи відповідно до обґрунтування дослідників [14]. Іммобілізований ферментний препарат *Lipozyme TL IM* з метою активації попередньо зволожувався водними розчинами лимонної кислоти або гідрокарбонату натрію з рН у діапазоні 6,5...8,3. Через певні проміжки часу з реакційної суміші відбиралися проби, фізико-хімічні показники яких аналізувалися згідно стандартних методик. Визначення рН водних розчинів ли-

монної кислоти та гідрокарбонату натрію для зволоження ферментного препарату визначено потенціометричним методом.

Визначення кислотного та пероксидного чисел жирової сировини, жирової реакційної суміші та переетерифікованих жирів проведено титрометричними методами згідно ДСТУ ISO 660 і ДСТУ ISO 3960. Визначення анізидинового числа жирової сировини та переетерифікованих жирів проведено колориметричним методом згідно ДСТУ ISO 6885. Визначення вмісту фосфоліпідів в жировій сировині проведено колориметричним методом згідно ДСТУ EN ISO 11701. Визначення масової частки вологи жирової сировини та переетерифікованих жирів проведено гравіметричним методом згідно ДСТУ 4603. Визначення температури плавлення жирової сировини, жирової реакційної суміші та переетерифікованих жирів проведено згідно ДСТУ EN ISO 6321. Визначення мила в жировій реакційній суміші та переетерифікованих жирах проведено згідно ДСТУ 6048 (ISO 10539). Приготування метилових ефірів жирних кислот жирової сировини та переетерифікованих жирів проведено згідно ДСТУ ISO 5509. Визначення жирнокислотного складу жирової сировини методом газо-рідинної хроматографії проведено згідно ДСТУ ISO 5508 на хроматографі Shimadzu (Японія).

Результати дослідження

Визначено фізико-хімічні показники дослідних зразків жирової сировини для біотехнологічної переетерифікації. Згідно з результатами досліджень, дослідні зразки жирової сировини відповідають вимогам, встановленим у відповідній нормативній документації – ДСТУ 4439/CAS 91079-14-0, ДСТУ 4562/CAS 8001-31-8, ДСТУ 4534/CAS 8001-22-7. Визначено жирнокислотний склад дослідних зразків жирової сировини для біотехнологічної переетерифікації. Результати дослідження наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Жирнокислотний склад дослідних зразків жирової сировини для біотехнологічної переетерифікації

Жирні кислоти	Зразки рафінованої, вибіленої та дезодорованої жирової сировини		
	пальмовий стеарин	кокосова олія	соєва олія
C _{8:0}	–	8,17	–
C _{10:0}	–	6,24	–
C _{12:0}	0,23	49,02	–
C _{14:0}	1,25	19,76	–
C _{16:0}	67,14	8,15	10,78
C _{16:1}	0,02	–	5,68
C _{18:0}	4,36	1,83	24,16
C _{18:1}	21,23	5,36	1,09
C _{18:2}	5,25	1,47	49,51
C _{18:3}	0,14	–	7,68
C _{20:0}	0,38	–	0,45
C _{20:1}	–	–	0,23
C _{22:0}	–	–	0,42
Разом	100,00	100,00	100,00

Відповідно до результатів досліджень, обрана сировина не містить трансізомерів жирних кислот, вміст яких регламентується для харчової продукції. Жирову сировину обрано з міркувань максимізації видів ацилів різної молекулярної маси та різного сту-

пеню насиченості для комплексного оцінювання фізико-хімічних показників отриманих переетерифікованих жирових продуктів.

З метою моделювання та оптимізації біотехнологічної переетерифікації жирових систем з використанням іммобілізованого ферментного препарату досліджено залежність ефективності процесу від таких факторів: попереднє зволоження ферментного препарату, $C_{w.s.}$, %; рН водного розчину, $pH_{w.s.}$, од. Критеріями ефективності біотехнологічної переетерифікації обрано: тривалість процесу – час, після якого температура плавлення жирового продукту реакції вже практично не змінюється, $\tau_{f.p.}$, год.; кислотне число переетерифікованого жиру, $AN_{f.p.}$, мг КОН/г; пероксидне число переетерифікованого жиру, $PN_{f.p.}$, ммоль $\frac{1}{2}$ O /кг.

Моделна жирова суміш для біотехнологічної переетерифікації складалася з пальмового стеарину, кокосової та соєвої олії у співвідношенні 1:1:1 відповідно. Для визначення залежності тривалості процесу біотехнологічної переетерифікації, кислотного числа, пероксидного числа жирового продукту від попереднього зволоження іммобілізованого ферментного препарату та рН водного розчину обрано метод багатofакторної регресії з побудовою поверхонь відгуку. Для побудови моделі використовували метод повного факторного експерименту. Попереднє зволоження іммобілізованого ферментного препарату варіювали в інтервалі 0...10 % з кроком 2 %. рН водного розчину (лимонної кислоти або гідрокарбонату натрію) варіювали в інтервалі 6,5...8,3 з кроком 0,3. Необхідно сказати, що вказані кислотний та лужний реагенти обрано через їх доволі «м'яку» дію на тригліцериди жирової реакційної суміші в попередніх дослідях з біотехнологічної переетерифікації порівняно з такими реагентами як хлороводнева кислота та натрію гідроксид. Тривалість експозиції зволоженого ферментного препарату складала 1 годину. Температура плавлення переетерифікованого жиру в залежності від способу зволоження ферментного препарату складала 32,3...32,6 °С.

Отримані значення тривалості процесу біотехнологічної переетерифікації знаходилися в межах 3,2...5,0 год.; кислотного числа переетерифікованих жирів – в межах 0,20...0,72 мг КОН/г; пероксидного числа переетерифікованих жирів – 0,55...0,85 ммоль $\frac{1}{2}$ O /кг. Поверхні отриманих залежностей представлено на рис. 1, а–в.

За допомогою рівнянь (1)–(3) представлено апроксимаційні залежності параметрів ефективності процесу біотехнологічної переетерифікації, а саме тривалості процесу ($\tau_{f.p.}$); кислотного числа продукту ($AN_{f.p.}$); пероксидного числа продукту ($PN_{f.p.}$) від факторів; попереднього зволоження ферментного препарату ($C_{w.s.}$); рН водного розчину для зволоження ($pH_{w.s.}$).

$$\tau_{f.p.}(C_{w.s.}, pH_{w.s.}) = 5,0358 - 0,1331 \cdot C_{w.s.} + 0,8006 \cdot pH_{w.s.} - 0,0037 \cdot C_{w.s.}^2 + 0,0158 \cdot C_{w.s.} \cdot pH_{w.s.} - 0,1221 \cdot pH_{w.s.}^2; \quad (1)$$

$$AN_{f.p.}(C_{w.s.}, pH_{w.s.}) = 0,2073 - 0,1105 \cdot C_{w.s.} - 0,0838 \cdot pH_{w.s.} + 0,0017 \cdot C_{w.s.}^2 + 0,0167 \cdot C_{w.s.} \cdot pH_{w.s.} + 0,011 \cdot pH_{w.s.}^2; \quad (2)$$

$$PN_{f.p.}(C_{w.s.}, pH_{w.s.}) = 0,5533 + 0,0011 \cdot C_{w.s.} - 0,0751 \cdot pH_{w.s.} - 0,0008 \cdot C_{w.s.}^2 + 0,0039 \cdot C_{w.s.} \cdot pH_{w.s.} + 0,0093 \cdot pH_{w.s.}^2. \quad (3)$$

Необхідно зазначити, що наведені апроксимаційні залежності описують реальний процес адекватно в інтервалах зволоження іммобілізованого ферментного препарату 0...10 % і рН водного розчину для зволоження – 6,5...8,3. Отже, окреслено діапазон до-

сліджених факторів, а саме: величини зволоження ферментного препарату водним розчином гідрокарбонату натрію (3...4 % мас.); рН розчину для зволоження (7,4...7,7). При цьому ефективність процесу переетерифікації підвищилася, а саме: тривалість процесу – 3,5...3,7 год., кислотне число переетерифікованих жирів – 0,15...0,20 мг КОН/г; пероксидне число продукту – 0,20...0,40 ммоль ½ О/кг.

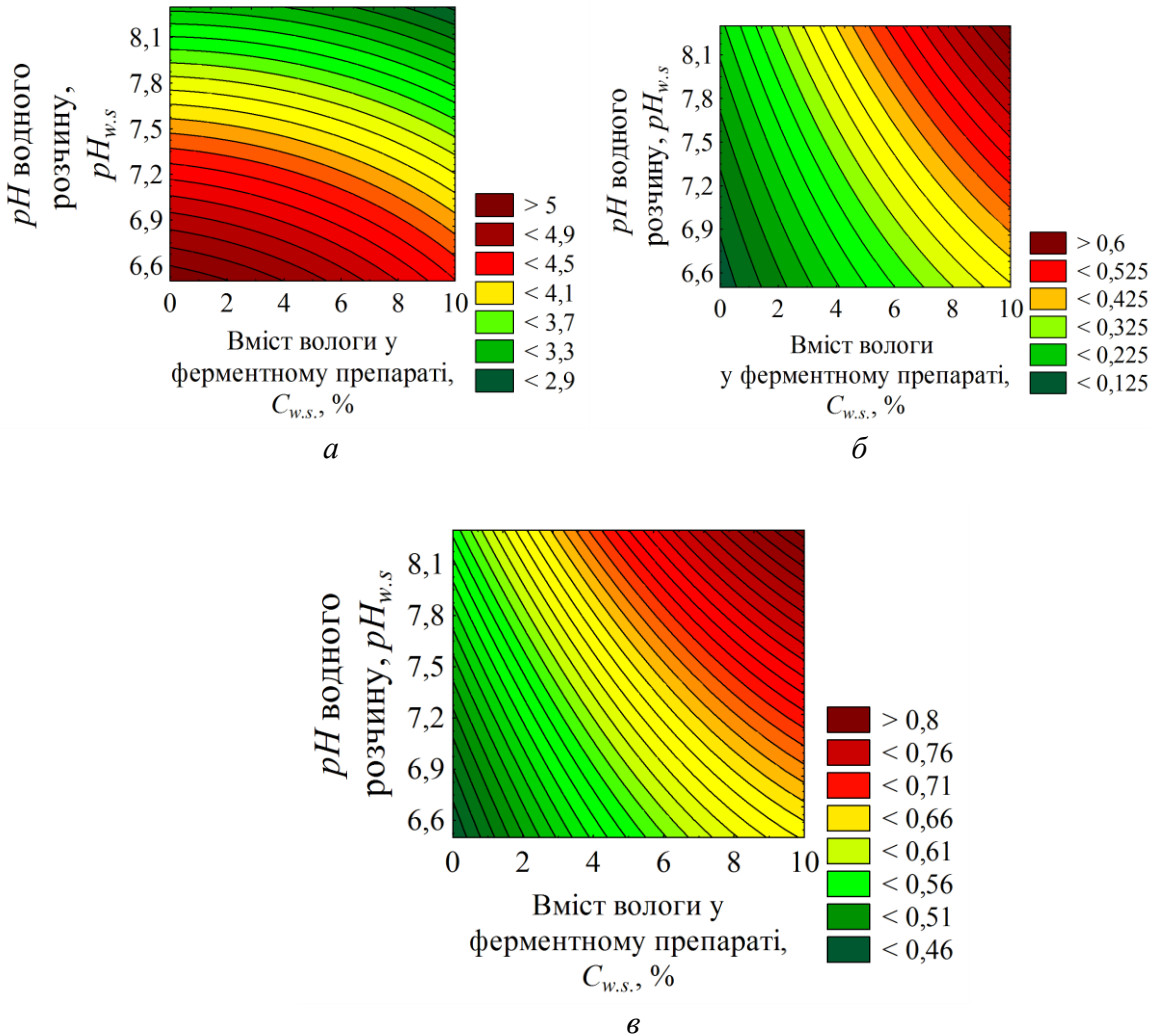


Рисунок 1 – Залежність від величини попереднього зволоження іммобілізованого ферментного препарату та рН водного розчину: *а* – тривалості процесу біотехнологічної переетерифікації; *б* – кислотного числа; *в* – пероксидного числа переетерифікованих жирів

Варто відзначити, що зволоження ферментного препарату водними розчинами у кількості більш, ніж 3...4 % мас. в діапазоні рН, що досліджувався, призводить до погіршення фізико-хімічних показників переетерифікованих жирів. Під час зволоження розчинами з рН менше, ніж 7,3, і більше, ніж 7,8, крім реакції переетерифікації, перетікає реакція гідролізу жирової реакційної суміші і, відповідно, реакції окиснювального псування. Це можна ідентифікувати через позитивну пробу на мило (за умови дії лужних розчинів у кількості більш, ніж 3...4 % мас.). Також за вказаних умов перетікають процеси накопичення вільних жирних кислот та первинних продуктів окиснення (підвищення кислотного та пероксидного чисел), це знижує якісні показники кінцевого продукту. Ґрунтуючись на отриманих результатах досліджень, скориговано умови прове-

дення біотехнологічної переетерифікації (п. п. 4. 2). Запропоноване зволоження іммобілізованого ферментного препарату водним розчином гідрокарбонату натрію з *pH* у діапазоні 7,4...7,7 у кількості 3 % мас. і витримки зволоженого ферментного препарату протягом 15 хвилин.

Визначено фізико-хімічні показники переетерифікованого жиру, отриманого за удосконаленою технологією. Результати дослідження порівняно з фізико-хімічними показниками переетерифікованого жиру, отриманого за загальноприйнятою технологією (зволоження ферментного препарату – 0 %) і наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Фізико-хімічні показники переетерифікованого жиру, отриманого за удосконаленою технологією

Фізико-хімічні показники	Зразки переетерифікованого жиру, отриманого за технологією	
	удосконаленою	загальноприйнятою (контрольний зразок)
Кислотне число, мг КОН/г	0,24	0,26
Пероксидне число, ммоль ½ O /кг	0,58	0,60
Анізидинове число, у.о.	1,70	1,70
Масова частка води та летких речовин, %	0,02	0,04
Температура плавлення, °С	33,4	33,2
Тривалість процесу біопереетерифікації, год.	3,5	5,0

Згідно з отриманими результатами досліджень (табл. 3), зразок переетерифікованого жиру, отриманого за удосконаленою технологією, практично не відрізняється від зразку переетерифікованого жиру, отриманого за загальноприйнятою технологією. Різниця між зразками, що досліджувалися, є лише у тривалості процесу біотехнологічної переетерифікації, яка за удосконаленою технологією становить 3,5 години, що на 30 % менше, ніж у контрольного зразка. Необхідно додати, що отриманий зразок продукції за фізико-хімічними показниками відповідає вимогам ДСТУ 4336.

Визначено жирнокислотний склад переетерифікованого жиру, отриманого за удосконаленою технологією. Результати дослідження наведено в табл. 4.

Таблиця 4 – Жирнокислотний склад переетерифікованого жиру, отриманого за удосконаленою технологією

Вміст жирних кислот, %													
C _{8:0}	C _{10:0}	C _{12:0}	C _{14:0}	C _{16:0}	C _{16:1}	C _{18:0}	C _{18:1}	C _{18:2}	C _{18:3}	C _{20:0}	C _{20:1}	C _{22:0}	Разом
2,81	2,11	16,40	6,98	28,67	1,91	10,11	9,22	18,73	2,59	0,26	0,07	0,14	100,00

Відповідно до результатів досліджень, процес переетерифікації пройшов у повному обсязі (відповідно до даних табл. 2), обрана сировина не містить трансізомерів жирних кислот, вміст яких регламентується для харчової продукції.

Висновки

Визначено фізико-хімічні показники (кислотне, пероксидне, анізидинове числа, масова частка фосфоровмісних речовин, масова частка води, температура плавлення)

і жирнокислотний склад жирової сировини (пальмовий стеарин, кокосова, соєва олії) для біотехнологічної переестерифікації. Означена жирова сировина відповідає вимогам ДСТУ 4439, ДСТУ 4562, ДСТУ 4534 відповідно.

Проведено моделювання та оптимізацію біотехнологічної переестерифікації жирових систем з використанням іммобілізованого ферментного препарату *Lipozyme TL IM*. Встановлено залежність тривалості процесу біотехнологічної переестерифікації, кислотного та пероксидного чисел жирового продукту від попереднього зволоження іммобілізованого ферментного препарату та рН водного розчину, що дозволяє знизити тривалість процесу біотехнологічної переестерифікації приблизно на 30 %. Рациональні значення параметрів: вміст водного розчину гідрокарбонату натрію – 3...4 % від маси іммобілізованого ферментного препарату; рН розчину гідрокарбонату натрію – 7,4...7,7.

За фізико-хімічними показниками зразок переестерифікованого жиру, отриманого за удосконаленою технологією, відповідає показникам зразку переестерифікованого жиру, отриманого за загальноприйнятою технологією, одержаного без зволоження лужним розчином іммобілізованого ферменту, згідно ДСТУ 4336. Характеристики отриманого зразку переестерифікованого жиру: кислотне число – 0,26 мг КОН/г; пероксидне число – 0,60 ммоль $\frac{1}{2}$ O /кг анізидинове число – 1,70 у.о.; масова частка вологи та легких речовин – 0,04 %; температура плавлення – 33,2 °С.

Література

1. Kumar, A., Dhar, K., Kanwar, S. S. et al. Lipase catalysis in organic solvents: advantages and applications // *Biological Procedures Online*. 2016. Vol. 18. P. 1.
2. Sytnik, N., Demidov, I., Kunitsa, E., Mazaeva, V., Chumak, O. A study of fat interesterification parameters' effect on the catalytic reaction activity of potassium glycerate // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 3(6). P. 33–38.
3. Remonato, D., Miotti, Jr. R., Monti, R. et al. Applications of immobilized lipases in enzymatic reactors: A review // *Process Biochemistry*. 2022. Vol. 114. P. 1–20.
4. Xie, W., Zang, X. Immobilized lipase on core-shell structured Fe₃O₄-MCM-41 nanocomposites as a magnetically recyclable biocatalyst for interesterification of soybean oil and lard // *Food Chemistry*. 2016. Vol. 194. P. 1283–1292.
5. Meunier, S. M., Kariminia, H.-R., Legge, R. L. Immobilized enzyme technology for biodiesel production // *Advances in Biofeedstocks and Biofuels*. 2016. Vol. 2. P. 67–106.
6. Fernández, A., Longo, M. A., Deive, F. J. Dual role of a natural deep eutectic solvent as lipase extractant and transesterification enhancer // *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 346. P. 131095.
7. Sharma, S., Bhatt, R. Enhanced production of Commercially Important Amylolytic Enzyme // *Lambert Academic Publishing*. 2021.
8. Samoylova, Yu., Piligaev, A., Sorokina, K. N. Application of the immobilized bacterial recombinant lipase from *Geobacillus stearothermophilus* G3 for the production of fatty acid methyl esters // *Catalysis in Industry*. 2016. Vol. 8(2). P. 187–193.
9. Pinheiro, B. B., Riosa, N. S., Rodríguez Aguado, E., Fernandez-Lafuente, R. Chitosan activated with divinyl sulfone: a new heterofunctional support for enzyme immobilization. Application in the immobilization of lipase B from *Candida antarctica* // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2019. Vol. 130. P. 798–809.

10. Ismail, A. R., Kashtoh, H., Baek, K. H. et al. Temperature-resistant and solvent-tolerant lipases as industrial biocatalysts: Biotechnological approaches and applications // International Journal of Biological Macromolecules. 2021. Vol. 187. P. 127–142.
11. Patzl-Fischerleitner, E., Eder, R. Determination of enzymatic activities of commercial enzyme preparations // Mitteilungen Klosterneuburg. 2009. Vol. 59(1). P. 8–14.
12. Penga, B., Chena, F., Liu, X. et al. Trace water activity could improve the formation of 1,3-oleic-2-medium chain-rich triacylglycerols by promoting acyl migration in the lipase RM IM catalyzed interesterification // Food Chemistry. 2020. Vol. 113. P. 126130.
13. Osorio, N. M., da Fonseca, M. R., Ferreira-Dias, S. Operational stability of *Thermomyces lanuginosus* lipase during interesterification of fat in continuous packed-bed reactor // European Journal of Lipid Science and Technology. 2006. Vol. 108. P. 545–553.
14. Nekrasov, P. O., Gudz, O. M., Nekrasov, O. P., Berezka, T. O. Optimizing the parameters of the production process of fat systems with a minimum content of trans-isomers // Питання хімії та хімічної технології. 2020. Vol. 3. P. 128–133.

УДК 577.152.1:661.73:66.094.941

О. М. Близнюк, д. техн. н., професор, О. І. Осецький, д. ф.-м. н., професор,
В. В. Мінухін, д. м. н., професор, А. П. Белінська, к. техн. н., доцент,
Н. Ю. Масалітіна, к. техн. н., доцент, О. О. Варанкіна, к. техн. н., доцент,
І. А. Белих, к. біол. н., доцент, Т. В. Школьнікова, к. техн. н., доцент

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ БІОТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПЕРЕЕТЕРИФІКАЦІЇ ЖИРОВИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ *LIPOZYME TL IM*

Об'єктом дослідження в роботі є моделювання та оптимізація процесу біотехнологічної переетерифікації жирових систем за допомогою іммобілізованого ферментного препарату *Lipozyme TL IM*. В роботі вирішено задачу активації ферментного препарату за допомогою зволоження водним розчином гідрокарбонату натрію з рН 7,4...7,7 (3 % мас.). Отримані результати дозволяють мінімізувати тривалість процесу переетерифікації з одночасним отриманням високоякісного продукту. Запропонована обробка ферментного препарату дозволяє знизити тривалість процесу біопереетерифікації в модельній жировій суміші (пальмовий стеарин, кокосова та соєва олії у співвідношенні 1 : 1 : 1 відповідно) до 3,5...3,7 год. В результаті одержано продукт з високими якісними показниками – кислотним (до 0,26 мг КОН/г), пероксидним (до 0,60 ммоль $\frac{1}{2}$ O /кг) та анізидиновим (1,70 у.о.) числами. Отримані дані пояснюються тим, що для ефективного біокаталізу ліполітичним ферментам як білковим молекулам, є необхідним існування двох фаз – ліпідної і водної, це забезпечується обґрунтованими в дослідженні параметрами активації. Особливістю отриманих результатів є можливість активації ферментного препарату, яку в промислових умовах не передбачено через загрозу гідролітичних процесів сировини і готової продукції, що призводить до погіршення якості готового продукту. Результати досліджень дозволяють мінімізувати гідролітичні процеси в жировій системі під час переетерифікації з одночасним підвищенням ефективності процесу. З практичної точки зору виявлений механізм активації дозволяє корегування умов обробки ферментного препарату в технології переетерифікації жирових систем. Прикладним аспектом використання наукового результату є можливість удосконалення ти-

пового технологічного процесу переетерифікації жирів.

Ключові слова: біотехнологічна переетерифікація, моделювання та оптимізація, іммобілізований ферментний препарат, тривалість переетерифікації, показники якості переетерифікованого жиру.

O. M. Bliznjuk, O. I. Osetskyi, V. V. Minukhin, A. P. Belinska, N. Yu. Masalitina,
O. O. Varankina, I. A. Bielykh, T. V. Shkolnikova

MODELING AND OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF BIOTECHNOLOGICAL TRANSESTERIFICATION OF FATTY SYSTEMS USING *LIPOZYME TL IM*

The object of research in the work is the modeling and optimization of the process of biotechnological transesterification of fatty systems using the immobilized enzyme preparation *Lipozyme TL IM*. The study addresses the activation of the enzyme preparation by moistening it with an aqueous solution of sodium bicarbonate with a pH of 7.4–7.7 (3% mass). The obtained results minimize the duration of the interesterification process while ensuring the production of a high-quality product. The proposed treatment of the enzyme preparation reduces the duration of the biotechnological interesterification process in a model fat mixture (palm stearin, coconut, and soybean oils in a 1:1:1 ratio) to 3.5–3.7 hours.

As a result, a product with high-quality indicators is obtained, including acid value (up to 0.26 mg KOH/g), peroxide value (up to 0.60 mmol $\frac{1}{2}$ O/kg), and anisidine value (1.70 units). These results are explained by the necessity of two phases—lipid and aqueous—for effective biocatalysis by lipolytic enzymes as protein molecules, achieved through the activation parameters substantiated in the study.

A unique feature of the obtained results is the ability to activate the enzyme preparation, which is typically not provided under industrial conditions due to the risk of hydrolytic processes in raw materials and finished products, leading to a decline in product quality. The findings of the study minimize hydrolytic processes in the fat system during interesterification while simultaneously increasing process efficiency.

From a practical perspective, the discovered activation mechanism allows for the adjustment of enzyme preparation treatment conditions in fat interesterification technology. An applied aspect of this scientific result is the potential improvement of the standard technological process of fat interesterification.

Keywords: biotechnological transesterification, modeling and optimization, immobilized enzyme preparation, transesterification duration, quality indicators of transesterified fat.