УДК 547.298.1:547.915(048.8)

Д.Г. Філінський, О.В. Черваков, К.Є. Варлан

СИНТЕЗ, ВЛАСТИВОСТІ, ВИКОРИСТАННЯ АМІДІВ ЖИРНИХ КИСЛОТ: ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

**Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, Україна**

У статті надано огляд сучасного стану наукових досліджень у галузі синтезу, дослідження властивостей та можливостей практичного застосування амідів жирних кислот як перспективних олеохімічних продуктів багтоцільового призначення. Проаналізовано тенденції переходу хімічної індустрії до відновлюваної сировини рослинного та тваринного походження в межах концепції «зеленої хімії». Приділено увагу хімічній структурі амідів жирних кислот, що зумовлює їхні унікальні амфіфільні, колоїдно-хімічні та теплофізичні властивості. Проведено аналіз методів синтезу амідів з різної жирової сировини, систематизовано дані щодо багатоцільового використання амідів жирних кислот як екологічно безпечних біорозкладних поверхнево-активних речовин, пластифікаторів, інгібіторів корозії, модифікаторів гуми і бітуму, функціональних добавок у лакофарбові матеріали, а також інноваційних теплоакумулюючих матеріалів фазового переходу. У статті окреслено перспективні напрями досліджень для сприяння подальшому розвитку синтезу та використання амідів жирних кислот.

Ключові слова: олеохімія, аміди жирних кислот, відновлювана сировина, функціональні матеріали, синтез, властивості.

DOI: 10.32434/0321-4095-2026-168-5-4-21

Вступ

До пріоритетних напрямів розвитку різних галузей промисловості можна віднести: використання відновлюваної сировини, ресурсозбереження та екологізацію виробництва, впровадження безвідходних технологій. Сучасний розвиток світової хімічної індустрії характеризується масштабним переходом від викопної нафтохімічної сировини до відновлюваних біоресурсів. У фокусі концепції «зеленої хімії» та циркулярної економіки особливе місце посідає олеохімія. Рослинні олії та тваринні жири є екологічно безпечною, нетоксичною та відновлюваною альтернативою нафтопродуктам. Серед усього різноманіття олеохімічних сполук стрімко зростає інтерес до амідів жирних кислот (АЖК), які є перспективними об'єктами для створення широкого спектра функціональних матеріалів [1].

Підвищена увага до АЖК зумовлена їхньою амфіфільною хімічною структурою, що забезпечує унікальний комплекс колоїдно-хімічних, поверхнево-активних та теплофізичних властивостей. На сьогодні ці сполуки мають статус продуктів багатоцільового призначення. Вони ефективно використовуються як: екологічні поверхнево-активні речовини (загусники, ко-емульгатори та стабілізатори піни в косметиці та побутовій хімії); функціональні добавки (інгібітори

© Д.Г. Філінський, О.В. Черваков, К.Є. Варлан, 2026

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

корозії, агенти ковзання для полімерів, пластифікатори та модифікатори бітуму); компоненти енергоощадних матеріалів (органічних теплоакумуляторів фазового переходу) тощо.

Накопичені за останні роки наукові дані щодо методів синтезу, фізико-хімічних властивостей та нових векторів практичного застосування АЖК потребують систематизації, аналізу, узагальнення та визначення найбільш перспективних напрямків досліджень для сприяння подальшого розвитку олеохімії. Сучасні дослідження, спрямовані на використання відновлюваних сировинних ресурсів, набувають все більшого значення, особливо при впровадженні у виробництва принципів сталого розвитку. Роботи виконуються з застосуванням інноваційних методів дослідження, їм притаманна глибина вивчення кінетики процесів, властивостей отримуваних сполук, особливостей використання їх у різних галузях промисловості.

Метою даної статті є систематизація та аналіз сучасних науково-технічних досягнень у сфері одержання та застосування амідів жирних кислот як перспективних відновлюваних продуктів олеохімії, визначення бар'єрів їхнього виробництва та окреслення пріоритетних напрямків подальших досліджень для розширення сфер багатоцільового використання.

АЖК являють собою органічні сполуки, в яких −OH група, присутня в карбоксильній групі (R−COOH) жирної кислоти (ЖК), заміщена аміногрупою ($-NH_2$; −NHR або $-NR_2$). Відповідно утворюються первинні ($R-CONH_2$), вторинні (R−CONHR') або третинні (R−CONR'R'') АЖК, де R' і R'' можуть являти собою водень, жирноалкільну, арильну або алкіленоксидну групи.

В окрему групу амідів виділяють продукти реакції ЖК з моноетаноламіном або діетаноламіном. Вони відомі як Cocamide DEA та Cocamide MEA, випускаються під багатьма комерційними назвами і широко застосовуються як емульгатори та піноутворювачі у виробництві косметичної продукції [2]. Бісаміди жирних кислот (БАЖК) за структурною будовою складаються з двох ланцюгів ЖК, з'єднаних діаміновим містком. Такі структурні особливості забезпечують їм достатньо високий рівень температури плавлення та термічної стабільності і чудову термостабільність. Бісаміди є високоефективними добавками для модифікації властивостей гум, полімерних і лакофарбових матеріалів.

Залежно від природи жирнокислотного залишку можна виділити аміди насичених (стеаринової, пальмітинової тощо) або ненасичених (олеїнової, лінолевої тощо) ЖК, причому останні можуть бути як мононенасиченими (з одним подвійним зв'язком) так і поліненасиченими ЖК (з декількома подвійними зв'язками в жирноки-слотному ланцюгу). У той же час, жирнокислотні залишки рицинової олії можуть в містити своїй структурі гідроксильну (−OH) групу.

Природа жирної кислоти, довжина її вуглеводневого ланцюга та ступінь ненасиченості відіграють вирішальну роль у формуванні фізико-хімічних та функціональних властивостей АЖК [3]. Амідна група забезпечує полярність, тоді як жирнокислотний радикал відповідає за гідрофобність, впливаючи на агрегатний стан, розчинність та поверхневу активність. Чим довший вуглеводневий ланцюг ЖК, тим вища температура плавлення аміду. Аміди з короткими ланцюгами (<C10) зазвичай рідкі, тоді як аміди вищих ЖК (C16−C22) є твердими, воскоподібними речовинами з високими температурами плавлення. Зі збільшенням довжини жирнокислотного ланцюга гідрофобність зростає, а розчинність у воді зменшується. Щодо впливу природи жирнокислотного залишку на агрегатний стан, то аміди довголанцюгових насичених ЖК являють собою тверді речовини при кімнатній температурі, тоді як аміди ненасичених ЖК рідкі або м'які, оскільки присутні в них подвійні зв'язки перешкоджають щільній упаковці молекул. Наявність в жирнокислотному залишку додаткових полярних груп (наприклад, −OH), підвищує розчинність АЖК в полярних розчинниках та покращує його емульгуючі властивості.

Первинні та вторинні аміди здатні утворювати сильний водневий зв'язок, що пояснює їх високі температури плавлення та низьку розчинність у більшості розчинників.

Багато АЖК практично нерозчинні у воді. У разі третинних амідів зазвичай утворення воднев их зв'язків неможливе, про що свідчить їхня підвищена розчинність і нижчі температури плавлення. АЖК здатні знижувати тертя на різних поверхнях, утворюючи на них покривний шар. Така властивість може бути обумовлена, в першу чергу, їх гідрофобним характером.

Первинні, вторинні та бісаміди ЖК широко використовуються як мастильні або ковзні агенти. Вони в цілому стійкі до підвищених температур обробки, окислення на повітрі, а також до дії розбавлених кислот та основ.

Аміди, отримані з натуральних олій (пальмової, соєвої, соняшникової тощо), через різноманітність ЖК у їх складі [4], часто виявляють комплексну дію як поверхнево-активні речовини (ПАР), емульгатори та модифікатори.

Одержання амідів з жирних кислот і їх похідних

Процес прямого одержання АЖК базується на відповідній реакції кислоти (або її похідних) з азотовмісною сполукою.

У синтезі АЖК використовуються різні методи. Найпоширенішими є ті, що включають реакцію жирних кислот з аміаком (1) або амінами (2) [5]:

$$RC(O)OH+NH_3\rightarrow RC(O)NH_2+H_2O, \quad (1)$$

$$RC(O)OH+R'NH_2\rightarrow RC(O)NHR'+H_2O. \quad (2)$$

За типом використовуваної сировини методи одержання АМЖ класифікують як аміди, отримані з ЖК, з тригліцеридів (олій, жирів), з естерів та з хлорангідридів. Монозаміщені та дизаміщені аміди можуть бути синтезовані реакцією ЖК та алкіламінів з використанням або без використання каталізаторів та/або розчинників. АЖК можна отримати прямою конденсацією з амінами, але ця реакція відбувається при температурі вище 100^0C.

Одержання амідів жирних кислот без використання каталізатора зазвичай базується на термічних методах, які потребують високих температур для подолання енергетичного бар'єра реакції. Жирні кислоти (наприклад, стеаринова, пальмітинова) реагують з аміаком з утворенням амонійних солей (3), які при нагріванні розкладаються до амідів (4):

$$RC(O)OH+NH_3\rightarrow [RC(O)O^-NH_4^+], \quad (3)$$

$$[RC(O)O^- \ NH_4^+]\rightarrow RC(O)NH_2+H_2O. \quad (4)$$

Реакція проводиться при нагріванні (зазвичай, вище 100–150^0C), залежно від кислоти, без каталізаторів, часто з видаленням води в процесі реакції для зміщення рівноваги. Прямі реакції амінів з карбоновими кислотами за умови використання каталізаторів протікають за нижчих температур, що робить їх застосування набагато привабливішим. Не завжди було зрозуміло, якою мірою пряме некаталітичне утворення аміду конкурує з каталізованою реакцією, хоча відомо, що певні комбінації карбонової кислоти та аміну можуть забезпечити одержання відповідного аміду з хорошим виходом і за відсутності каталізу. У роботі [6] приділена увага вивченню механізму некаталізованої реакції прямого утворення аміду та ролі у цьому процесі водневих зв'язків карбонових кислот.

Бісаміди можна отримати реакцією ЖК з етилендіаміном у мольному співвідношенні 2:1 у присутності кислотного каталізатора (5):

$$2RC(O)OH+NH_2-CH_2-CH_2-NH_2\rightarrow$$
$$\rightarrow RC(O)-NH-CH_2-CH_2-NH-(O)CR+2H_2O. \quad (5)$$

У дослідженнях описано пряме амідування карбонових кислот з використанням каталізаторів на основі похідних бору [7], фосфору та кремнію [8,9], цирконію [10,11], танталу [12], заліза [13], силікагелю [14] тощо.

Так, у роботі [15] при дослідженні прямого синтезу амідів з різних ЖК (пальмітінової, стеаринової, олеїнової, лінолевої, ліноленової, рицинолевої), у тому числі з синтезованої фенілоктадеканової кислоти, вивчалася кінетика процесу і здійснювався вибір оптимального типу каталізатора для проведення процесу. Вихід продуктів реакції амідування довголанцюгових ЖК, каталізованої борною кислотою, коливався в межах від 34,7% (для фенілоктадеканової кислоти) до 79% (для лінолевої кислоти), тоді як каталітичний ефект від використання 3,4,5-трифторфенілборної кислоти був значно вищим і посилювався за вищої температури. Зокрема, при проведенні процесу амідування при 120^0C вихід амідів для різних кислот становив: для фенілоктадеканової кислоти 97,6%; для пальмітинової і стеаринової 98,6%; для олеїнової 98,3%; для лінолевої 96,7%; для ліноленової 98,7%; для рицинолевої 81,0%. Щодо визначення ефективності різних типів використовуваних у дослідженні каталізаторів на прикладі реакції амідування фенілоктадеканової кислоти, то найбільший вихід кінцевого продукту отримували при використанні 3,4,5-трифторфенілборної кислоти (табл. 1). Високі виходи можуть бути досягнуті і без каталізаторів за температури понад 156^0C, що знижує вартість процесу та є цікавим для використання в промисловості.

Одержувати АЖК можна реакцією з карбамідом:

$$RC(O)OH+NH_2C(O)NH_2\rightarrow RC(O)NH_2+CO_2+NH_3. \quad (6)$$

Цю реакцію проводять при високих температурах, щоб розплавити карбамід та забезпечити видалення побічних продуктів. Процес взаємодії жирних кислот з карбамідом є складним, а його швидкість визначається реакціями розкладу та перетворення аміду. Він здійснюється при температурах 160–210^0C, тривалість проведення реакції становить більше 8 годин. Суттєва тривалість та

досить жорсткі умови проведення роблять даний процес енергозатратним та таким, що не відповідає сучасним вимогам більшості вітчизняних виробництв мастильних матеріалів.

У зв'язку з цим, був проведений пошук ефективних каталізаторів для процесу амідування жирних кислот карбамідом. Як каталізатори досліджувались неорганічні солі лужних та лужноземельних металів, оксиди металів тощо. Встановлено, що карбонати лужних металів та амонію майже не впливали на швидкість реакції амідування олеїнової кислоти карбамідом. Оксид алюмінію пришвидшував реакцію приблизно в 1,2 рази, а в присутності 0,5–1% карбонату кальцію швидкість реакції зростала в 1,4–2,5 рази.

У дослідженні синтезу ерукаміду з використанням карбаміду було вивчено кінетику процесу і визначені оптимальні умови проведення реакції, а саме: молярне співвідношення ерукової кислоти до сечовини 1:4; температура 190^{0}C; концентрація каталізатора (суміш P_2O_5 і $(NH_4)_2HPO_4$ у масовому співвідношенні 1:1) 3% від маси ерукової кислоти. Такі умови дозволили отримати максимальний вихід чистого ерукаміда на рівні 92% [16]. В дослідженнях були випробувані інші каталізатори, такі як ізопропоксид титану і пентоксид фосфору, але вони виявилися неекономічними.

У роботі [17] стеарамід отримували реакцією амідифікації стеаринової кислоти та карбаміду з використанням в якості каталізатора тетрахлориду цирконію і сумішевого розчинника (на основі 2-пропанолу і н-гексану). Для оптимізації виходу стеараміду варіювалися такі параметри, як молярне співвідношення субстрату, концентрація каталізатора та співвідношення розчинників. Було встановлено, що збільшення молярного співвідношення субстрату та концентрації каталізатора призводило до збільшення конверсії стеаринової кислоти, а найвищий вихід стеараміду був отриманий при молярному співвідношенні субстрату 8:1 (карбамід:стеаринова кислота), концентрації каталізатора 4% від маси стеаринової кислоти та при співвідношенні розчинників 1:1. Найвища конверсія стеаринової кислоти становила 90%.

У дослідженні [18] наведена інформація про синтез похідних жирних кислот 4-метоксибензиламідів (рис. 1) з використанням каталізатора DCC/DMAP – пари реагентів, які найчастіше використовуються разом в органічній хімії для проведення реакції естерифікації (утворення естерів) або амідного зв'язку за м'яких умов.

У літературі ця комбінація відома як естерифікація за Штегліхом (Steglich esterification). DCC (N,N'-дициклогексилкарбодиімід) – це реагент зневоднення та активації. Він хімічно «вилучає» воду, активуючи карбонову кислоту до високореактивного проміжного комплексу. DMAP (4-диметиламінопіридин) – це високоефективний нуклеофільний каталізатор. Він швидко взаємодіє

Таблиця 1

Вихід продуктів реакції амідування фенілоктадеканової кислоти з використанням різних типів каталізаторів

Каталізатор	Вихід продукту реакції (аміду), %
H_3BO_3	34,7±3,8
3,4,5-трифторфенілборна кислота	97,6±1,4
$ZrCl_4$	41,0±2,5
$ZnCl_2$	7,0±2,5
$FeCl_3$	22,0±4,3
ZnO	17,0±5,0
NaF ($CaCl_2$)	15,0±2,5
$TiCl_4$	77,0±2,5
силікагель	24,7±3,8
без каталізатора	7,3±2,9

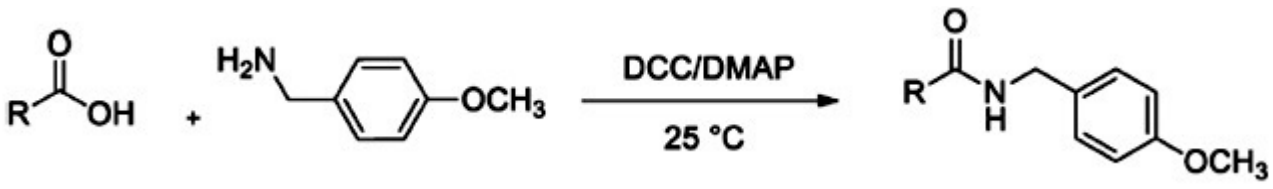


Рис. 1. Схема синтезу амідів жирних кислот 4-метоксибензиламіна з використанням DCC/DMAP як каталізатора

з активованою кислотою, утворюючи ще більш реакційноздатну сполуку (ацил-піридинієву сіль). Це дозволяє спирту легко приєднатися, завершуючи реакцію за кімнатної температури.

Амідування жирних кислот до відповідних амідів ефективно каталізується ліпазою *Candida antartica* (Novozym 435). У роботі [19] були виконані дослідження каталізованого ліпазою синтезу ерукаміду (на основі продуктів взаємодії ерукової кислоти і карбаміду) в органічному розчиннику та встановлені оптимальні умови проведення процесу. Вихід чистого ерукаміду становив 88,74% через 48 годин при температурі 60^{0}C і молярному співвідношенні ерукова кислота:карбамід=1:4. Як органічний розчинник використовувався трет-бутиловий спирт (2-метил-2-пропанол), а кількість використовуваного каталізатора становила 3%.

Одержання амідів жирних кислот з тригліцеридів

Синтезу АЖК з тригліцеридів (ТГ) рослинних олій часто передує стадія їх розщеплення на жирні кислоти (гідроліз), що приводить до двостадійного процесу. Процес каталітичний, здійснюється за високих температур (до 240^{0}C), тривалість реакції до 72 години. Розроблено [20] одноетапний метод синтезу жирних амідів безпосередньо з жирних ефірів з використанням кулінарного та некулінарного жирного ефіру, арахісової та рицинової олій відповідно. Зразки були гідролізовані NaOH у неводному середовищі та реагував з NH_4Cl при 50^{0}C протягом 60 хвилин без додавання каталізатора. Для реакцій арахісової та рицинової олій зафіксовано конверсії 83% та 79%, відповідно.

Одностадійне та двостадійне амідування нехарчових тригліцеридів з високим вмістом вільних жирних кислот з використанням нанокаталізатора на основі змішаної основи Бронстеда та Льюїса 2,5-Li@CaO-Ca(OH)$_2$-450, забезпечило вихід амідного продукту на рівні 99% [21]. Нанокаталізатор мав велику площу поверхні і високу основність, продемонстрував чудову можливість багаторазового використання та структурну стабільність. Для порівняльного дослідження в якості носіїв були також протестовані MgO і ZnO, леговані нітратом літію. Отриманий амідний продукт може слугувати двофункціональною присадкою до дизельного палива.

У роботі [22] досліджено вплив амідів N,N-біс(2-етоксіетил)жирних кислот на трибологічні характеристики гасу, що використовується як паливо для двигунів внутрішнього згоряння. Були синтезовані (рис. 2) сім зразків N,N-біс(2-етоксиетил)амідів з різних рослинних олій (оливкова олія, соняшникова олія, соєва олія, бавовняна олія, олія насіння тютюну, кокосова олія, відпрацьована олія для смаження), які додавалися в авіаційне паливо військового призначення JP-8.

Необхідні дозування жирних кислот N,N-біс(2-етоксиетил)амідів для зменшення діаметра сліду зносу нижче максимально допустимої межі 460 мкм знаходилися в діапазоні від 150 до 300 ppm. Подальше додавання амідів не приводило до суттєвого поліпшення змащувальних властивостей базового палива. Серед окремих типів синтезованих N,N-біс(2-етоксиетил)-амідів жирних кислот, кращими змащувальними речовинами виявилися зразки, які були отримані з оливкової олії (з вмістом мононенасиченої олеїнової кислоти ≈75% і насиченої пальмітинової кислоти ≈11,6%) та з кокосової олії. Остання містила значну кількість насичених жирних кислот: 49,2% лауринової кислоти і 18,5% міристинової. В інших зразках переважаючими були диненасичені жирні кислоти (лінолева кислота): в бавовняній олії її вміст становив 55,8%, а в олії з насіння тютюну – 69,5%.

У роботі [23] вивчався вплив діізопропаноламідів жирних кислот на змащувальні власти-

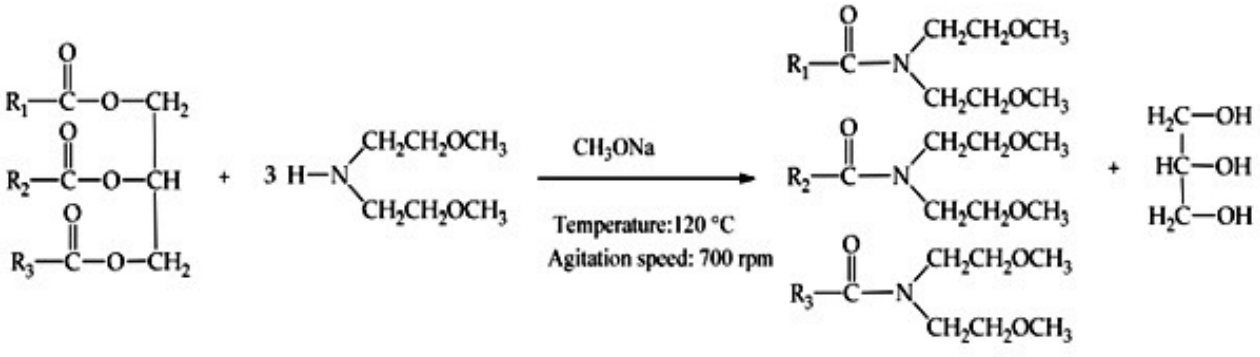


Рис. 2. Загальна схема реакції синтезу N,N-біс(2-етоксиетил)амідів жирних кислот

вості суднового газойлю. Останній з низьким вмістом сірки не забезпечує задовільного змащування та може призводити до пошкодження паливних насосів суднових дизельних двигунів. Аміди вказаної групи одержували з попередньо вказаних семи різних джерел (рослинних і відпрацьованої олії). Результати досліджень показали, що рівні концентрації діізопропаноламідів жирних кислот від 60 до 120 ppm зменшували початкове значення діаметра плями зносу базового палива в межах допустимої вимоги 520 мкм. Подальше внесення амідів не забезпечувало додаткового покращення змащувальної здатності палива. Кращі властивості з семи досліджуваних зразків, показали діізопропаноламіди жирних кислот, отриманих з оливкової та кокосової олій, як і в попередній роботі. Аналогічний ефект група дослідників отримала і від використання, синтезованих моноетаноламідів (рис. 3) з тригліцеридів тієї ж групи жирової сировини, що і в двох попередніх роботах [22,23]. Як мастильні добавки до низькосірчаного газойлю всі використані суміші моноетаноламідів забезпечили задовільний середній діаметр плями зносу, який був менше 520 мкм при концентраціях 80–140 ppm. Нижчі ніж 80 ppm концентрації моноетаноламідів не впливали на мастильну здатність палива [24].

У роботі [25] синтезовано серію N-моно- і N,N-дизаміщених амідів жирних кислот з високим виходом за допомогою амінолізу метилових ефірів довголанцюгових жирних кислот в умовах відсутності розчинника. Вивчено доцільність їх використання як альтернативних добавок до біодизельного палива. У тестах на окислювальну стабільність всі аміди викликали лише незначне збільшення індукційного періоду соєвого біодизелю, що пояснюється їх структурними особливостями, зокрема відсутність сильно резонансно-стабілізованих антиоксидантних фрагментів. Це й обмежувало їх ефективність як інгібіторів окислення.

Проведено дослідження [26] можливості перетворення використаних кулінарних олій на амідні сполуки для подальшого застосування їх як ефективних інгібіторів корозії вуглецевої сталі в середовищах соляної кислоти. Збільшення концентрації інгібітора значно підвищувало уявний опір, показуючи, що аміди жирних кислот, найімовірніше, утворювали запобіжний шар, який і підвищував здатність поверхні протистояти корозії. Розробка екологічно чистих інгібіторів на основі амідів з відпрацьованої кулінарної олії вказала на численні екологічні переваги та може сприяти розвитку галузі досліджень сталого розвитку процесів корозії.

Найбільшу частку у світовому виробництві інгібіторів корозії становлять аміди (діаміди), аміни, імідазолінові основи та їх суміші, які є основою більшості сучасних інгібіторів корозії. Дослідженню захисних властивостей інгібіторів корозії, одержаних з відновлювальної сировини присвячується все більше робіт. Синтезовано нові інгібітори корозії на основі рослинних та тваринних жирів взаємодією з ди- або триетаноламінами [27], визначено оптимальні умови їх синтезу і досліджено інгібуючу здатність на зразках зі сталі, алюмінію та міді.

У роботі [28] аміди жирних кислот синтезували з нативної, частково та повністю гідрогенізованої соєвої олії та різних амінів. Продукти, синтезовані з діамінами, були моно- або дизаміщеними залежно від співвідношення жирної кислоти до аміну. Реакція проводилася без розчинників з використанням нетоксичного каталізатора. Для більшості первинних амінів процес синтезу та очищення приводив до високого ви-

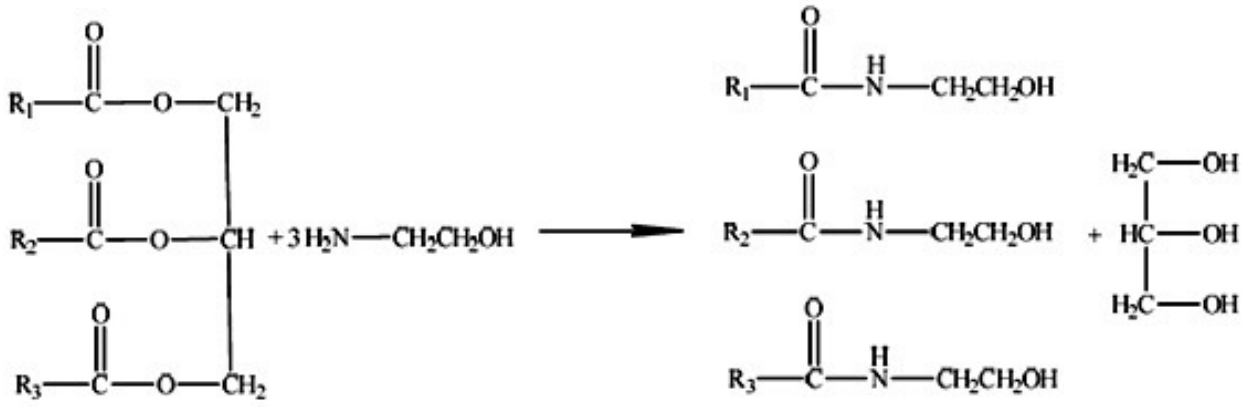


Рис. 3. Загальна схема синтезу моноетаноламідів жирних кислот з тригліцеридів різних видів олій і відпрацьованої олії для смаження

ходу та чистоти отримуваного продукту. Вплив довжини ланцюга досліджували використовуючи аміни С2–С16 та синтезуючи дизаміщені аміди жирних кислот. Була виявлена загальна тенденція до збільшення ентальпії плавлення та вужчого діапазону температур фазового переходу зі збільшенням довжини ланцюга первинних амідів. Протилежна тенденція була характерна для деяких зразків дизаміщених амідів. Досліджено [29] можливість синтезу біорозчинних амідів жирних кислот для застосування у МФП з комерційних рослинних олій (кукурудзяної, соняшникової, пальмової) та первинних алкіламінів (табл. 2).

На основі отриманих результатів можна стверджувати, що ці матеріали мають потенціал для використання як МФП. Хоча прихована теплота цих амідів знаходиться на низькому рівні для застосування МФП (близько 100–140 кДж/кг), вони мають низку переваг, які можуть дозволити їм конкурувати з іншими органічними МФП, які отримують з нафти. Їх синтез є простим і не вимагає використання інертних атмосфер, високого тиску або токсичних каталізаторів. Ці аспекти відображаються високими значеннями екологічності (EcoScale), отриманими для амідів, які коливалися від 72,5 до 82,5. Ще однією позитивною особливістю є те, що аміди з різними температурами переходу можна отримати залежно від використовуваного аміну, що дозволяє розробляти МФП для конкретного застосування. Найголовніше, що навіть коли вони складаються із суміші амідів різної довжини та ступеня ненасиченості, у більшості випадків спостерігається лише один ефективний перехід, що усуває необхідність розділення або фракціонування після виробництва. Навіть у випадку пальмової олії, де фракціонування є необхідним, очікується, що це буде нескладний процес, оскільки існують лише дві фази, а їхні температури плавлення знаходяться далеко одна від одної.

У роботі [30] проводили спочатку епоксидування ацилгліцеринів соняшникової олії з наступним введенням різних амінів як по карбонільній групі, так і по епоксидному кільцю (рис. 4). Оскільки фосфатиди і вільні жирні кислоти являються інгібіторами реакції епоксидування, для дослідження брали рафіновану олію. Процес виконували з наступними амінами: моноетаноламін; діетаноламін; трис(гідроксиметил)амінометан; втор-бутиламін; діетиламін; дибутиламін; 3,3'-метил-дибутиламін; октадециламін, для яких характерні різні величини температури кипіння (плавлення). Епоксидування проводили 40% пероксидом водню в середовищі безводної мурашиної кислоти. В залежності від реакційної здатності аміну суміш нагрівали до 50–145^{0}С і витримували при оптимальній температурі 5–12 годин.

Залежно від виду аміну, співвідношення вихідних реагентів, умов синтезу, вихід амідамінів жирних кислот рослинної олії коливався від 85 до 100% (табл. 3). Збільшення довжини вуглеводневого ланцюга амінів на один атом вуглецю потребувало підвищення температури синтезу на 5–15^{0}С разом зі збільшенням тривалості процесу на 0,5–1,5 години для отримання високих виходів. Властивості отриманих зразків порівнювали з вихідним базовим мастилом, і за своїми антиокислювальними, антикорозійними та механічними характеристиками вони не поступалися товарним продуктам. Отримані результати досліджень вказують на перспективність використання синтезованих продуктів як функціональних присадок до мастильних матеріалів.

Одержання амідів жирних кислот з естерів

Процес здійснюється реакцією відповідних естерів з аміаком (7) або амінами (8):

$$RC(O)OR'+2NH_3 \rightarrow RC(O)NH_2+R'OH, \quad (7)$$

$$RC(O)OR'+R''NH_2 \rightarrow RC(O)NHR''+R'OH. \quad (8)$$

Метилові естери жирних кислот (МЕЖК), відомі також як біодизель, відіграють важливу роль у процесах амідування, слугуючи ключовою сировиною для отримання відповідних амідів. Процес амідування естерів, як і хлорангідридів,

Таблиця 2

Вихід продуктів реакції комерційних олій з амінами після очищення

Олія	Амін	Вихід, %	Амін	Вихід, %
кукурудзяна	бутиламін	70	додециламін	72
	октиламін	85	гексадециламін	78
соняшникова	бутиламін	77	додециламін	74
	октиламін	81	гексадециламін	81
пальмова	бутиламін	80	додециламін	70
	октиламін	83	гексадециламін	83

протікає легше, ніж для вільних жирних кислот, оскільки вони є кращими ацилюючими агентами. Сировиною для одержання МЕЖК слугують відновлювані джерела (рослинні олії, тваринні та перероблені жири), а також інша жирова сировина (відпрацьовані кулінарні жири, відходи рафінаційних виробництв тощо) [31]. Методологія використання такого напряму синтезу детально описано в оглядовій статті [1].

У роботі [32] для синтезу діамідів використовували МЕЖК, які отримували з мікробних ліпідів. Останні були вилучені з двох видів грибів (*C. echinulata* і *U. Isabellina*) і морської мікроводорості (*N. Gaditana*), які здатні накопичувати ліпіди, що містять поліненасичені жирні кислоти. Ферментативний синтез діамідів жирних кислот (рис. 5) виконувався з використанням іммобілізованих ліпаз, таких як *Candida rugosa*.

Завдяки своїй амфіфільній структурі та доведеній здатності адсорбуватися на сталевих поверхнях жирні кислоти та їх похідні, включаючи аміди, широко використовуються в якості присадок до мастильних матеріалів. Через значну корозійну активність вільних жирних кислот їх по-

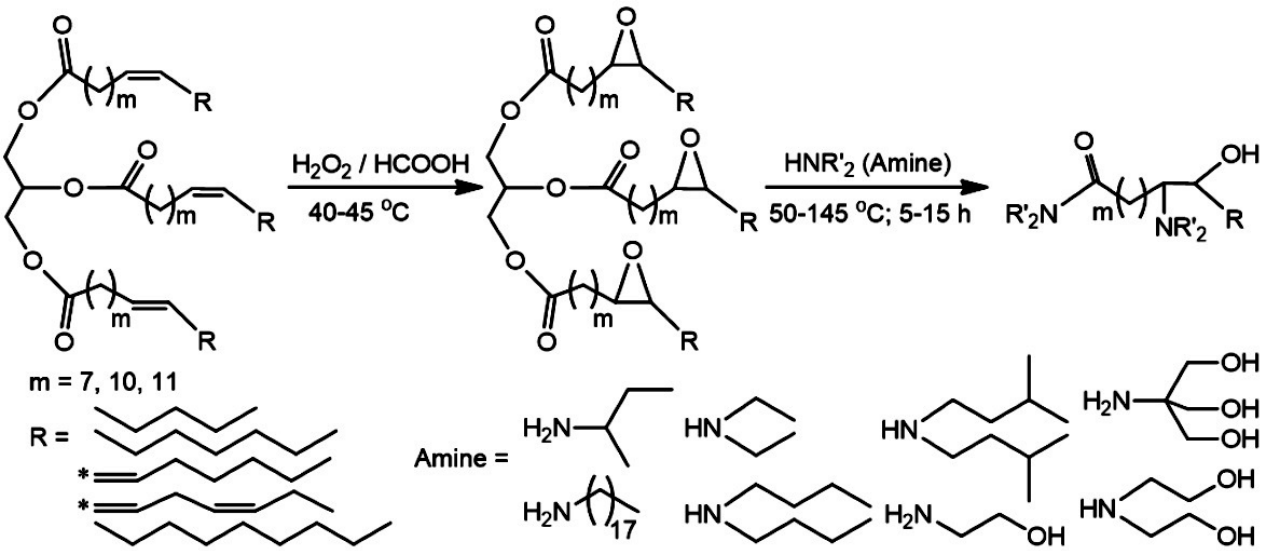


Рис. 4. Схема реакції епоксидування тригліцеридів олії з наступним амідуванням

Таблиця 3

Умови реакції та вихід амідамінів жирних кислот

Вихідні речовини/кількість молів			Умови проведення синтезу		Вихід, мас.%
ЕО*	Амін	Каталізатор	Температура, ^{0}C	Тривалість, год	
1	моноетаноламін/6	–	60	5	98,8
1	діетаноламін/6	–	85	5	100
1	трис(гідроксиметил)-амінометан/6	KOH/0,1	130	7	95,2
1	трис(гідроксиметил)-амінометан/6	–	140	8	96,3
1	втор-бутиламін/6	KOH/0,1	65	6	97,0
1	діетиламін/6	KOH/0,1	60	9	98,9
1	дибутиламін/6	–	135	12	100
1	дибутиламін/6	KOH/0,1	110	8	99,3
1	3,3'-метил-дибутиламін/6	–	150	14	99,0
1	3,3'-метил-дибутиламін/6	KOH/0,1	140	12	85,0
1	октадециламін/6	–	160	12	98,6
1	октадециламін/6	KOH/0,1	140	8	100

Примітка: * – епоксидована олія.

тенційне застосування обмежене; проте похідні жирних кислот, такі як аміди, слугують перспективнішими добавками.

У роботі [33] були досліджені аеробні та протизносні властивості первинних амідів низки кислот: лауринової, міристинової, пальмітинової, стеаринової, олеїнової та ерукової. Аміди отримували реакцією з карбамідом. Продукти реакції піддавали екстракції розчинником хлороформом, а потім очищенню н-гексаном, етанолом та ацетонітрилом. Аміди жирних кислот у складі нафтових мастил забезпечують останнім підвищений рівень фізико-хімічних та трибологічних властивостей, такі як зниження діаметра сліду зношування, показника навантаження на зварний шов та коефіцієнт тертя. Було проведено порівняльні дослідження сумішей присадок з концентрацією 1%, 3%, 5% з комерційними нафтовими базовими маслами 150N і 500N (табл. 4).

Досліджені аміди забезпечували зниження діаметра сліду зносу до 35% та у низці випадків збільшували величину максимального зварювального навантаження. Автори роботи дійшли висновку, що трибологічні характеристики первинних амідів покращувалися зі збільшенням молекулярної маси.

Одержання амідів жирних кислот з хлорангідридів

Цей процес є одним із найефективніших і найпоширеніших лабораторних та промислових методів. Він ґрунтується на високій реакційній здатності хлорангідридів до нуклеофільного заміщення, зокрема під дією аміаку або амінів.

Хлорангідриди жирних кислот (RC(O)Cl) реагують з аміаком (9), первинними або вторинними амінами (10) з утворенням відповідних амідів:

$$RC(O)Cl+2NH_3\rightarrow RC(O)NH_2+NH_4Cl, \quad (9)$$

$$RC(O)Cl+R'NH_2+основа\rightarrow RC(O)NHR'+ +основа\cdot HCl. \quad (10)$$

Процес реалізується при помірних температурах, але у випадку використання довголанцюгових жирних кислот можлива потреба дії підвищених температур. Оскільки в ході реакції виділяється хлороводень, який може зв'язувати вихідний амін, в синтезі використовують надлишок аміну або додають іншу основу (наприклад, NaOH, піридин тощо) для нейтралізації кислоти.

Авторами роботи [34] був запропоновано простий та високоефективний метод утворення амідів з ацилхлоридів з використанням слабкої неорганічної основи (K_3PO_4) як зв'язувача кислоти в безводних умовах. Також вивчалася ефективність використання в реакції типу (11) і таких основ як Na_2HPO_4, K_2SO_3, K_2CO_3, Cs_2CO_3 тощо. У роботі [35] пальмітамід отримували конденсацією пальмітоїлхлориду з аміаком у присутності триетиламіну, а в дослідженнях [36] описано синтез первинних амідів шляхом додавання хлорангідриду до крижаного розчину NH_4OH у співвідношенні 1:6.

Більш складні структури амідів можуть забезпечувати додаткові властивості [37], наприклад, 1,3-діолеамід-2-пропілолеат (DOAPO), який містить полярні амідні, естерні та неполярні алкільні ланцюги (рис. 6).

У роботі було вивчено стабільність при зберіганні і трибологічні властивості DOAPO у синтетичній базовій оливі та проведено порівняння з комерційним олеамідом. Результати показали, що DOAPO має кращу термічну стабільність і стабільність при зберіганні в синтетичній базовій оливі. Крім того, додавання 0,5 мас.% DOAPO сприяло скороченню періоду приробітку і зменшенню середнього коефіцієнта тертя та діаметра

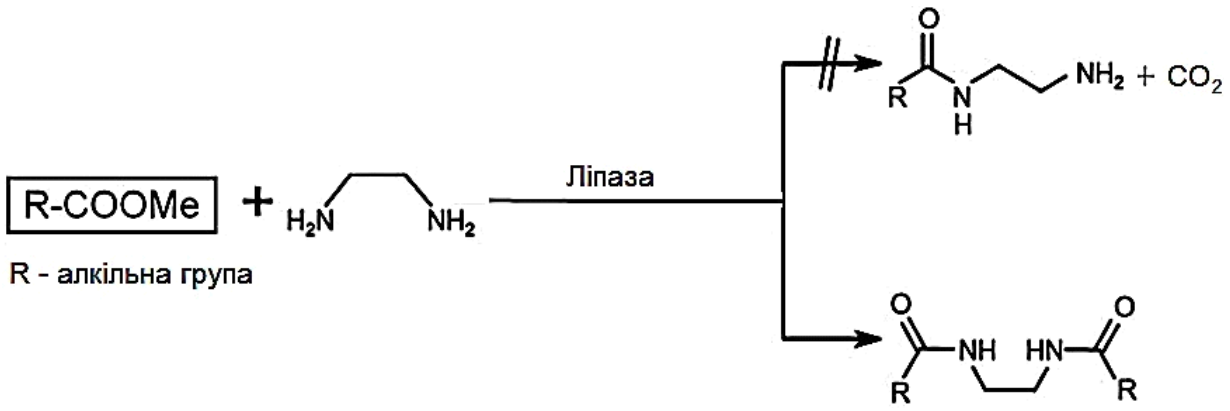


Рис. 5. Схема ферментативного синтезу діамідів жирних кислот

зносової плями на 8,2% та 16,2%, відповідно. Аналіз зношеної поверхні та результати теоретичних розрахунків показали, що складноефірний зв'язок в DOAPO переважно розривається під час тертя, що може зменшувати міжфазну зсувну силу і легко вступати в реакцію з металевими поверхнями з утворенням плівок оксиду заліза, демонструючи тим самим кращі показники зниження тертя та зносостійкості.

До високоефективних органічних модифікаторів тертя, що додаються до мастильних матеріалів, можна віднести N-(2,2,6,6-тетраметил-1-оксил-4-піперидиніл)додеканамід, що має назву C12Amide-TEMPO, який можна отримати 4-amino-TEMPO (4-аміно-2,2,6,6-тетраметилпіперидин-1-оксилу) та лауроїлхлориду (додеканоїлхлориду) у середовищі CH_2Cl_2 або хлороформу (рис. 7) [38].

У роботах [39,40] вивчено вплив хімічного складу головної групи аміду, яка характеризується жорстким шестичленним кільцем, затиснутим амідною групою та кінцевим вільним кисневим радикалом. Результати досліджень показали, що C12Amide-TEMPO перевершує традиційні модифікатори, особливо щодо несучої здатності, зменшення зносу та стабільності тертя з часом. Добавка C12Amide-TEMPO сприяє утворенню ефективних граничних плівок на поверхнях оксиду заліза з унікальною двошаровою структурою. Міцний поверхневий адсорбційний шар формується завдяки хімічній взаємодії амідного кисню та вільного радикала з поверхнями оксиду заліза, а верхній шар – завдяки міжшаровому водневому зв'язку між амідним воднем та вільним радикалом або між амідним воднем та киснем. Крім того, можливе внутрішньошарове водневе

Таблиця 4

Слід зношування і навантаження на зварний шов мастил з амідами жирних кислот

Добавка		Слід зношування (мм) при додаванні в мастило		Навантаження на зварний шов (кг) при додаванні в мастило	
Назва	Кількість, %	500N	150N	500N	150N
амід лаурилової кислоти	1	0,62±0,011	0,68±0,011	165	135
	3	0,57±0,012	0,62±0,011	180	150
	5	0,53±0,011	0,56±0,012	195	165
амід міристинової кислоти	1	0,59±0,012	0,62±0,012	180	150
	3	0,53±0,011	0,57±0,011	195	165
	5	0,47±0,011	0,52±0,011	210	180
амід пальмітинової кислоти	1	0,56±0,012	0,59±0,012	195	165
	3	0,51±0,013	0,34±0,012	210	180
	5	0,47±0,012	0,48±0,011	225	195
амід стеаринової кислоти	1	0,54±0,011	0,55±0,011	210	180
	3	0,49±0,012	0,49±0,013	225	195
	5	0,44±0,011	0,44±0,012	240	210
амід олеїнової кислоти	1	0,60±0,011	0,65±0,011	180	165
	3	0,55±0,012	0,60±0,012	195	180
	5	0,49±0,012	0,55±0,012	210	195
амід ерукової кислоти	1	0,57±0,011	0,60±0,011	210	210
	3	0,51±0,012	0,55±0,012	225	195
	5	0,47±0,012	0,49±0,012	240	210
мастило 500N (без добавки)		0,62±0,013	–	195	–
мастило 150N (без добавки)		–	0,68±0,012	–	165

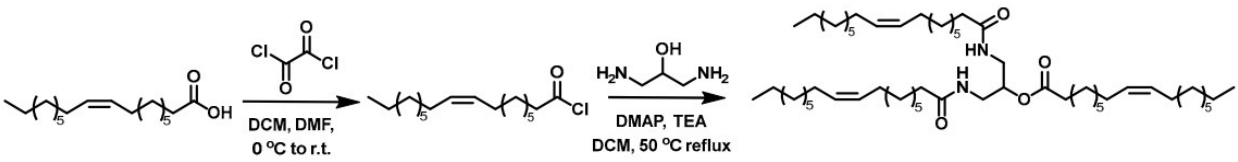


Рис. 6. Схема синтезу 1,3-діолеамід-2-пропілолеату (DOAPO)

утворення зв'язку в кожному з двох шарів. Було припущено, що окрім сильної поверхневої адсорбції, міжшарові та внутрішньошарові водневі зв'язки також збільшували міцність граничних плівок шляхом підвищення когезійної міцності, що призводило до високих трибологічних характеристик C12Amide-TEMPO.

У порівнянні зі стеариновою кислотою та стеаронітрилом, які не містять вільних радикалів і мають меншу головну групу, C12Amide-TEMPO показав найвищу адсорбційну здатність, що приблизно втричі перевищувала адсорбційну здатність стеаринової кислоти та стеаронітрилу. Крім того, він здатний утворювати більш стабільну та ефективну граничну плівку, зберігаючи тим самим високі трибологічні характеристики навіть за підвищених температур. Однак значна перешкода його циклічної головної групи призводила до зниження швидкості адсорбції та поверхневого покриття, що, впливало на його трибологічні характеристики. Розроблення нових органічних модифікаторів тертя на основі амідів з ланцюговою головною групою та адсорбцією має велике значення для покращення характеристик зниження тертя у широкому діапазоні температур [41].

У роботі [42] розроблений метод синтезу N-пропілпропанаміду (AC3C3), N-пропілоктанаміду (AC3C8) і N-пропілдодеканаміду (AC3C12), які можуть представляти собою перспективну групу нових протизносних/протиударних присадок для мастильних матеріалів, особливо для змазок, загущених діоксидом кремнію. Їх синтез відбувався у водному розчині за схемою, представленою на рис. 8. Вивчалася структура та зносостійкість присадок на основі амідів для мастил, загущених кремнеземом. З протестованих амідів найліпші властивості показав AC3C8.

Синтезовані аміди були введені на поверхню кремнезему (рис. 9) і досліджені. Структури були позначені наступним чином: SBA15-AC3C3, SBA15-AC3C8 та SBA15-AC3C12. Результати трибологічних випробувань показали, що аміди, іммобілізовані на SBA-15, показали кращі результати, ніж неіммобілізовані аміди.

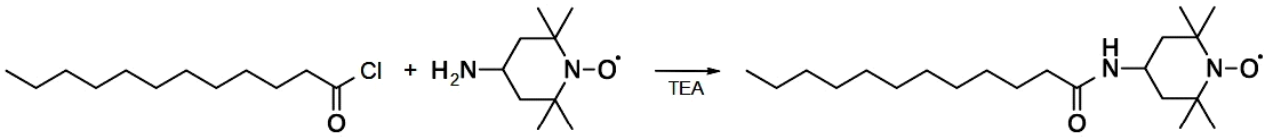


Рис. 7. Схема синтезу C12Amide-TEMPO

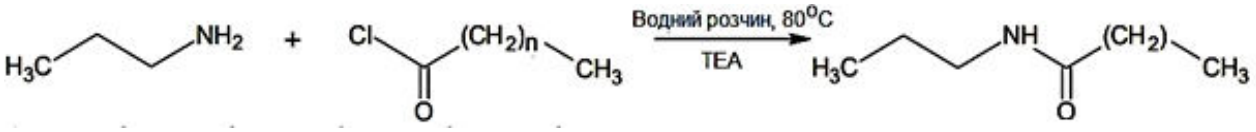


Рис. 8. Схема синтезу амідних сполук: n=1 – N-пропілпропанамід (AC3C3); n=6 – N-пропілоктанамід (AC3C8); n=10 – N-пропілдодеканамід (AC3C12) [42]

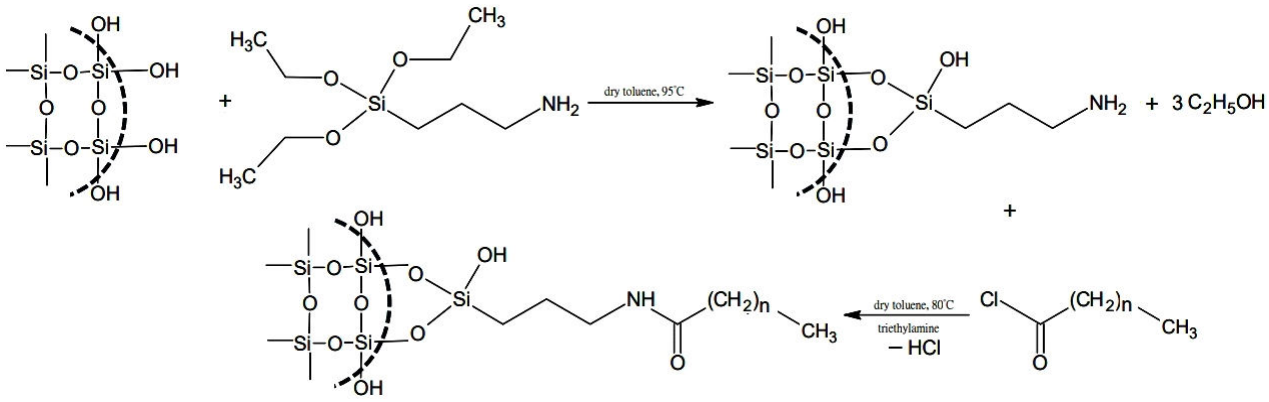


Рис. 9. Схема щеплення амідних сполук до наночастинок кремнезему SBA-15: n=1 – нанокремнезем SBA-15, щеплений N-пропілпропанамідом (SBA15-AC3C3); n=6 – нанокремнезем SBA-15, щеплений N- пропілоктанамідом (SBA15-AC3C8); n=10 – нанокремнезем SBA-15, щеплений N-пропілдодеканамід ом (SBA15-AC3C12) [42]

Тим не менш, недостатня стабільність модифікованого аміду SBA-15 при диспергуванні обмежує його використання в цільових сумішах і вимагає подальшого вдосконалення в ході досліджень. При тестуванні змазки, загущеної діоксидом кремнію, був виявлений синергетичний ефект між вільним амідом AC3C8 і комерційно доступною присадкою, що містить бутильований трифенілфосфат. При додаванні 2% мас./мас. комерційної присадки і 3% мас./мас. AC3C8 до базової маси було досягнуто збільшення параметра Goz40 (трибологічний параметр, що визначає граничне навантаження зносу) на 240% і збільшення зварювального навантаження (для роботи при екстремальних тисках) на 150%.

Аміди жирних кислот відіграють важливе значення у сучасній паливній промисловості, переважно як функціональні присадки, а не як основний компонент палива; і використовуються для покращення експлуатаційних характеристик дизельного палива та біодизеля. Вони підвищують змащувальну здатність низькосірчистого дизельного палива та біодизеля, що зменшує знос паливних насосів та форсунок; можуть виступати як компоненти, що запобігають утворенню відкладень у паливній системі та двигуні. Аміди жирних кислот захищають металеві деталі паливної апаратури від корозії; використовуються при створенні стійких паливних емульсій (наприклад, дизель–вода) для покращення згоряння та зниження викидів. Моноетаноламіди жирних кислот застосовуються для зменшення піноутворення під час заправки палива.

Як інгібітори корозії для нафтогазової промисловості була синтезована серія нових амідних похідних 13-докозенової кислоти [43], з якої попередньо отримали більш реакційноздатний хлорангідрид. Нові амідні похідні були отримані з високим виходом (більше 90%) з недорогих матеріалів: аніліну, о-анізидину, метиламіну, етиламіну, діетиламіну, 1-нафтиламіну, 3-аміно-1,2 тіофен-2-етиламіну.

Синтез та властивості поліестерамідів

Перспективним напрямком у зеленій хімії для створення біорозкладних смол є синтез поліестерамідів. Внесення амідних зв'язків у поліефірну матрицю дозволяє регулювати час життя покриття. Залежно від складу, вони можуть руйнуватися під дією мікроорганізмів, не утворюючи токсичних залишків та мікропластику. Утворення водневих зв'язків між амідними групами підвищує міцність, еластичність покриття та його стійкість до механічного стирання. Полярні групи забезпечують відмінне зчеплення з металом, бетоном та деревиною, ефективно захищаючи поверхні від вологи, кисню та агресивних хімічних середовищ.

У роботі [44] пальмітинову кислоту спочатку використовували як відновлюване джерело для отримання діетанолпальмітаміду шляхом реакції амідування. Далі амід перетворювали на поліестерамідну смолу шляхом реакції з іншим відновлюваним ресурсом, тобто димерною жирною кислотою, яка є димеризованим продуктом ненасичених жирних кислот рослинних олій. Біополіуретанові плівки та покриття були отримані шляхом реакції поліестерамідної смоли з аліфатичним діізоціанатом у присутності каталізатора за кімнатної температури. Дане дослідження показало можливість заміни дикарбонових кислот/ангідридів на основі нафти димерними жирними кислотами, а також запропонувало новий шлях використання промислових мономерів на основі рослинної олії для виготовлення смол.

Поліестерамідні смоли були успішно синтезовані шляхом амінолізу соняшникової олії діетаноламіном в м'яких каталітичних умовах, в результаті чого був отриманий N,N-біс(2-гідроксіетил)амід (HESA) з гідроксильним числом 9,02 мг KOH/г [45]. Потім HESA був полімеризований з N,N-біс(4-гідроксифеніл)малеамінової кислоти (BHPMA) і N,N-біс(4-сульфонфеніл)малеамінової кислоти (BSPMA) для утворення модифікованих поліестерамідних смол для застосування в захисних покриттях. Синтезовані покриття товщиною приблизно 30±5 мкм були оцінені на механічні та хімічні властивості, включаючи час сушіння від 58 до 60 годин в умовах сушіння на повітрі, а також підвищену корозійну стійкість, підтверджену 500-годинними випробуваннями в сольовому тумані. Поліпшені антикорозійні властивості пояснюються включенням сульфонових та ароматичних груп, які підвищують щільність плівки, хімічну стабільність та стійкість до проникнення іонів. Результати підтверджують можливість застосування цих біорозкладних смол як екологічно чистих та ефективних захисних покриттів для промислових поверхонь.

Поліестерамідну (CPEA) смолу на основі рицинової олії було успішно синтезовано шляхом конденсаційної полімеризації N-N-біс(2-гідроксіетил) жирного аміду рицинової олії (HECA) з терефталевою кислотою та додатково модифіковано різними відсотками 7, 9, 11 та 13 мас.% толуол-2,4-діізоціанату (TDI) для отримання полі(уретан-естераміду) (UCPEA) шляхом адитивної полімеризації [46].

Проведений аналіз останніх публікацій по-

казав, що на сьогодні питанням синтезу і використання амідів жирних кислот приділяється значна увага. Однак слід зазначити, що дослідження, які знаходяться на перетині органічного синтезу, біотехнології, матеріалознавства, попри значну кількість фундаментальних праць, мають низку технологічних та наукових бар'єрів. Оскільки амідам властива надзвичайно висока термодинамічна стабільність завдяки амідному резонансу (делокалізації неподіленої пари електронів азоту), їх пряме отримання та подальша активація супроводжуються певними труднощами, які потребують пошуку рішень. Проведення реакцій за принципами «зеленої хімії» (без розчинників) стикається з високою в'язкістю жирової сировини. Використання ліпаз у таких середовищах обмежене через їхню швидку дезактивацію субстратом, а механізми масообміну на межі фаз «твердий каталізатор/в'язка рідина» вивчені не достатньо глибоко. Також при прямому амідуванні утворюється вода, яка зміщує рівновагу реакції назад. Традиційне видалення води азеотропною відгонкою потребує високих температур (понад 160–180^{0}C), що руйнує цільові аміди. Тож потрібні нові каталізатори дегідратації, здатні працювати при температурах до 60^{0}C. Використання природної сировини (рослинні олії, мікроводорості тощо), що являє собою суміш тригліцеридів з різним ступенем ненасиченості та довжиною ланцюга, створює проблему вибіркового амідування конкретних жирних кислот. Відкритими залишаються і питання, пов'язані з механізмами керування поліморфізмом амідних матеріалів із фазовим переходом, що через зміну конфігурації амінного залишку практично не вивчені. А у полімерному виробництві швидкість дифузії аміду всередині полімерної матриці та кінетика формування захисного шару на металах досі розраховуються емпірично, без фундаментального термодинамічного опису.

Особливої уваги заслуговує питання розширення сировинної бази шляхом залучення нехарчових олій (наприклад, рицинової, ріпакової, олії з водоростей) та за рахунок використання трьох основних категорій відходів (вторинних ліпідних ресурсів), серед яких: багаті на вільні жирні кислоти та фосфоліпіди промислові відходи рафінації олій (соапстоки, фузи, бакові відстої, погони дезодорації); побутові та комерційні відходи (відпрацьовані фритюрні олії з ресторанного сектору та жирові відходи харчових виробництв); низькосортні тваринні жири (технічний жир, відходи м'ясопереробних комбінатів, жири з жировловлювачів стічних вод). Проблемою при роботі зі «всіма видами відходів» є їхній критично нестабільний хімічний склад: висока кислотність, наявність вологи, полімеризованих сполук, пігментів та механічних домішок. Вирішення цієї проблеми можливе за рахунок: впровадження гнучких багатоступеневих схем попередньої підготовки (фільтрація, дегідратація, відбілювання); застосування двостадійних технологій (попередня естерифікація вільних жирних кислот із наступним амідуванням); розробки каталітичних систем (зокрема, гетерогенних кислотно-основних та ферментативних каталізаторів), толерантних до високого вмісту домішок та води. Синтез амідів жирних кислот на основі відходів має екологічний та циркулярний ефект, він є класичним прикладом реалізації принципів «зеленої хімії» та циркулярної економіки. Перспективним напрямом досліджень є створення нових матеріалів, синтез функціоналізованих амідів (поліамідів, алканоламідів) для отримання «розумних» покриттів та біомедичних препаратів.

Висновки

Аналіз сучасного стану досліджень, наведений у цьому огляді, дозволяє охарактеризувати аміди жирних кислот як один із найперспективніших класів олеохімічних продуктів із високим потенціалом для сталого розвитку промисловості. Перехід від традиційної нафтохімічної сировини до відновлюваних рослинних і тваринних жирів відкриває широкі можливості для створення екологічно безпечних матеріалів нового покоління. Завдяки поєднанню гідрофільної амідної групи та гідрофобного вуглеводневого радикалу, ці сполуки демонструють високу поверхневу активність, змащувальну здатність та пластифікуючий ефект, що відкриває широкі можливості для їхнього багатоцільового використання. Вони знаходять застосування в якості: ефективних пластифікаторів та антиблокуючих агентів у виробництві пластмас; стабілізаторів піни, диспергаторів та інгібіторів корозії в нафтовидобувній та металообробній галузях; емульгаторів і структуроутворювачів у косметичній та фармацевтичній індустрії. Важливим аспектом використання амідів жирних кислот є їхня висока біорозкладність та низька токсичність для навколишнього середовища. Використання відновлюваної олеохімічної сировини (зокрема, технічних рослинних олій та відходів жирової промисловості) дозволяє суттєво знизити вуглецевий слід кінцевої продукції, що відповідає принципам «зеленої хімії» та концепції циркулярної економіки.

Конфлікт інтересів

Черваков О.В. є членом редакційної колегії

журналу, проте він не брав участі в процесі рецензування та прийнятті рішення щодо публікації цієї статті. Інші автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Oleochemical* products in synthesis technologies of eco-friendly polymers / Chervakov O.V., Chervakov D.O., Sukhyi K.M., Kuzminskyi V.Yu., Varlan K.Ye., Belyanovskaya E.A., Levchenko Ye.P., Yurchik M.S. // J. Chem. Technol. – 2024. – Vol.32. – No4. – P.969-992.

2. *The influence* of cocamide DEA towards the characteristics of transparent soap / Cholifah U., Nafiunisa A., Aryanti N., Wardhani D.H. // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. – 2021. – Vol.1053. – No. 1. – Art. No. 012016.

3. *Opsahl R.* Amides, fatty acid // Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. – 2000. – Vol.2. – P.442-463.

4. *Філінська Т.Г., Червяков О.В., Філінська А.О.* Рослинні олії. Довідник. – Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2015. – 425 с.

5. *Abel-Anyebe O., Ekpenyong K.I., Eseyin A.* A novel synthetic route to fatty amides in non-aqueous reaction of fatty esters with ammonium salts and methyl amine // Int. J. Chem. – 2013. – Vol.5. – No. 1. – P.80-86.

6. *The uncatalyzed* direct amide formation reaction – mechanism studies and the key role of carboxylic acid H-bonding / Charville H., Jackson D.A., Hodges G., Whiting A., Wilson M.R. // Eur. J. Org. Chem. – 2011. – No. 30. – P.5981-5990.

7. *de Figueiredo R.M., Suppo J.S., Campagne J.M.* Nonclassical routes for amide bond formation // Chem. Rev. – 2016. – Vol.116. – No. 19. – P.12029-12122.

8. *Peptide* bond-forming reaction via amino acid silyl esters: new catalytic reactivity of an aminosilane / Muramatsu W., Manthena C., Nakashima E., Yamamoto H. // ACS Catal. – 2020. – Vol.10. – No. 16. – P.9594-9603.

9. *Handoko, Panigrahi N.R., Arora P.S.* Two-component redox organocatalyst for peptide bond formation // J. Am. Chem. Soc. – 2022. – Vol.144. – No. 8. – P.3637-3643.

10. *Lundberg H., Tinnis F., Adolfsson H.* Direct amide coupling of non-activated carboxylic acids and amines catalysed by zirconium(IV) chloride // Chem. Eur. J. – 2012. – Vol.18. – No. 13. – P.3822-3826.

11. *Allen C.L., Chhatwal A.R., Williams J.M.J.* Direct amide formation from unactivated carboxylic acids and amines // Chem. Commun. – 2012. – Vol.48. – No. 5. – P.666-668.

12. *Tsuji H., Yamamoto H.* Hydroxy-directed amidation of carboxylic acid esters using a tantalum alkoxide catalyst // J. Am. Chem. Soc. – 2016. – Vol.138. – No. 43. – P.14218-14221.

13. *Solvent-free* «green» amidation of stearic acid for synthesis of biologically active alkylamides over iron supported heterogeneous catalysts / Maki-Arvela P., Zhu J., Kumar N., Eranen K., Aho A., Linden J., Salonen J., Peurla M., Mazur A., Matveev V., Murzin D.Yu. // Appl. Catal. A: Gen. – 2017. – Vol.542. – P.350-358.

14. *Ojeda-Porras A., Hernandez-Santana A., Gamba-Sanchez D.* Direct amidation of carboxylic acids with amines under microwave irradiation using silica gel as a solid support // Green Chem. – 2015. – Vol.17. – No. 5. – P.3157-3163.

15. *A high* yield method for the direct amidation of long-chain fatty acids / Wang M.-Y., Gang H.-Z., Zhou L., Liu J.-F., Mu B.-Z., Yang S.-Z. // Int. J. Chem. Kinet. – 2020. – Vol.52. – No. 2. – P.99-108.

16. *Awasthi N.P., Upadhayay S.K., Singh R.P.* Kinetic investigation of erucamide synthesis using fatty acid and urea // J. Oleo Sci. – 2008. – Vol.57. – No. 9. – P.471-475.

17. *Optimizing* process condition for amidification of stearic acid and urea using response surface methodology / Masyithah Z., Syukri M., Ashari M., Annisa N., Ginting A. // Rasayan J. Chem. – 2020. – Vol.13. – No. 2. – P.868-875.

18. *Design* and synthesis of fatty acid derived 4-methoxybenzylamides as antimicrobial agents / Nengroo Z.R., Ahmad A., Tantary A., Ganie A.S., Shah Z.U. // Heliyon. – 2021. – Vol.7. – No. 4. – Art. No. e06842.

19. *Awasthi N.P., Singh R.P.* Lipase-catalyzed synthesis of fatty acid amide (erucamide) using fatty acid and urea // J. Oleo Sci. – 2007. – Vol.56. – No. 10. – P.507-509.

20. *Fatty* amides in minutes: direct formation from fatty esters in a green synthetic process / Abel-Anyebe O., Idris N., Keita D., Ekpenyong K.I., Yakubu M.A. // Sci. J. Anal. Chem. – 2020. – Vol.8. – No. 1. – P.18-28.

21. *Kumar D., Park C.H., Kim C.S.* Sustainable heterogeneously catalyzed single-step and two-step amide derivatives of non-edible natural triglycerides as dual-functional diesel fuel additives // Ind. Crops Prod. – 2020. – Vol.158. – Art. No. 113001.

22. *Impact* of N,N-bis(2-ethoxyethyl) fatty acid amides on the lubrication performance of kerosene fuel F-34 for use in CI engines / Anastopoulos G., Schinas P., Zannikou Y., Komiotou M., Zannikos F., Karonis D. // Fuels. – 2023. – Vol.4. – No. 1. – P.19-32.

23. *The impact* of fatty acid diisopropanolamides on marine gas oil lubricity / Anastopoulos G., Kaligeros S., Schinas P., Zannikou Y., Karonis D., Zannikos F. // Lubricants. – 2017. – Vol.5. – No. 3. – Art. No. 28.

24. *Investigation* of the effectiveness of monoethanolamides as low sulfur marine fuel lubricity additives / Anastopoulos G., Schinas P., Zannikou Y., Karonis D., Zannikos F., Lois E. // Mater. Today: Proc. – 2018. – Vol.5. – No. 14. – Part 1. – P.27563-27571.

25. *Solvent-free* synthesis of fatty acid amides and evaluation of their usability as alternative biodiesel fuel additives / Meira M., Ferrer T.M., Luna S., Catarino F.B.S., Moreira L.B., Silva C.L., et al. // Braz. J. Chem. Eng. – 2026. – Vol.43. – Art. No. 006815.

26. *A novel* amide corrosion inhibitor derived from waste cooking oil for mild steel in hydrochloric acid / Abed K.M., Mohsen O.A., Al-Issawi A.G., Faraj M.W., Al-Shuwaiki N.M., Rahman S.A., et al. // Sci Rep. – 2025. – Vol.15. – Art. No. 41625.

27. *Оніськів І.М., Романчук В.В., Топільницький П.І.* Дослідження захисних властивостей інгібіторів корозії, одержаних з відновлювальної сировини // Вісн. нац. ун-ту «Львівська політехніка». Сер. Хімія, технологія речовин та їх застосування. – 2017. – № 868. – С.165-171.

28. *Zheng Y., Martinez C.J., Youngblood J.P.* Synthesis and characterization of long-chain (C20~C48) fatty acid amides (FAAms) from soybean oil and alkyl amines for phase change material applications // J. Appl. Polym. Sci. – 2023. – Vol.140. – No. 46. – Art. No. e54675.

29. *Betancourt-Jimenez D., Youngblood J.P., Martinez C.J.* Synthesis and characterization of fatty acid amides from commercial vegetable oils and primary alkyl amines for phase change material applications // ACS Sustainable Chem. Eng. – 2020. – Vol.8. – No. 36. – P.13683-13691.

30. *Використання* амідів олій в якості присадок до мастильних матеріалів / Сафронов О.І., Папейкін О.О., Вегнер І.О., Бодачівська Л.Ю. // Вісн. Одеського нац. ун-ту. Хімія. – 2018. – Т.23. – № 3(67). – С.29-39.

31. *Червяков О.В., Філінська Т.Г., Копитон В.О.* Способи переетерифікації жировмісної сировини методом алкоголіза // Питання хімії та хім. технол. – 2009. – № 4. – С.72-79.

32. *Single* cell oil (SCO)-based bioactive compounds: I–enzymatic synthesis of fatty acid amides using SCOs as acyl group donors and their biological activities / El-Baz H.A., Elazzazy A.M., Saleh T.S., Dritsas P., Mahyoub J.A., Baeshen M.N., et al. // Appl. Biochem. Biotechnol. – 2021. – Vol.193. – P.822-845.

33. *Khalkar S., Bhowmick D., Pratap A.* Synthesis and effect of fatty acid amides as friction modifiers in petroleum base stock // J. Oleo Sc. – 2013. – Vol.62. – No. 11. – P.901-904.

34. *An improved* method of amide synthesis using acyl chlorides / Zhang L., Wang X., Wang J., Grinberg N., Krishnamurthy D., Senanayake C.H. // Tetrahedron Lett. – 2009. – Vol.50. – No. 24. – P.2964-2966.

35. *Synthesis*, quantification, and characterization of fatty acid amides from in vitro and in vivo sources / Ni R., Bhandari S., Mitchell P.R.Jr., Suarez G., Patel N.B., Lamb K., Bisht K.S., Merkler D.J. // Molecules. – 2021. – Vol.26. – No. 9. – Art. No. 2543.

36. *Primary* fatty acid amide metabolism: conversion of fatty acids and an ethanolamine in N18TG2 and SCP cells / Farrell E.K., Chen Y., Barazanji M., Jeffries K.A., Cameroamortegui F., Merkler D.J. // J. Lipid Res. – 2012. – Vol.53. – No. 2. – P.247-256.

37. *Preparation* and tribological behaviors of sulfur- and phosphorus-free organic friction modifier of amide–ester type / Xu X., Yang F., Yang H., Zhao Y., Sun X., Tang Y. // Lubricants. – 2024. – Vol.12. – No. 6. – Art. No. 196.

38. *Evaluation* of nonionic nitroxyl lipids as potential organ-specific contrast agents for magnetic resonance imaging / Gallez B., Demeure R., Debuyst R., Leonard D., Dejehet F., Dumont P. // Magn. Reson. Imaging. – 1992. – Vol.10. – No. 3. – P.445-455.

39. *Adsorption* behavior of TEMPO-based organic friction modifiers during sliding between iron oxide surfaces: a molecular dynamics study / Chen X., Yang J., Yasuda K., Koga N., Zhang H. // Langmuir. – 2022. – Vol.38. – No. 10. – P.3170-3179.

40. *Molecules* with a TEMPO-based head group as high-performance organic friction modifiers / Hou J., Tsukamoto M., Hor S., Chen X., Yang J., Zhang H., et al. // Friction. – 2023. – Vol.11. – P.316-332.

41. *Preparation* and tribological study of novel amide-based organic friction modifiers / Hu M., Ma R., Zhang Sh., Han Y., Zhao J., Zhang M., Li W., Liu H. // Tribol. Int. – 2024. – Vol.194. – Art. No. 109465.

42. *Amide-based* anti-wear/extreme-pressure additives for silica-thickened greases: structure and wear resistance / Drabik J., Korasiak K., Chrobak J., Kozdrach R., Woch J., Cyl M., Zarebska M., Kazmierczak B., Ilowska J., Szymanska K. // Molecules. – 2025. – Vol.30. – No. 12. – Art. No. 2492.

43. *Synthesis* of a new class of corrosion inhibitors derived from natural fatty acid: 13 Docosenoic acid amide derivatives for oil and gas industry / Elsharif A.M., Abubshait S.A., Abdulazeez I., Abubshait H. // Arab. J. Chem. – 2020. – Vol.13. – No. 5. – P.5363-5376.

44. *Fatty* acids based transparent polyurethane films and coatings / Rajput S.D., Hundiwale D.G., Mahulikar P.P., Gite V.V. // Prog. Org. Coat. – 2014. – Vol.77. – No. 9. – P.1360-1368.

45. *Synthesis* and characterisation of new modified polyesteramide resins based on sunflower oil for anticorrosive protective coatings / Ali O.A.A., Al Shareef H.F., Felaly R., El-Sawy M.M. // Sci Rep. – 2025. – Vol.15. – Art. No. 32265.

46. *Shaik M.R., Alam M., Alandis N.M.* Development of castor oil based poly(urethane-esteramide)/TiO_2 nanocomposites as anticorrosive and antimicrobial coatings // J. Nanomater. – 2015. – Vol.2015. – Art. No. 745217.

Надійшла до редакції 12.03.2026
Надійшла після виправлення 03.08.2026
Прийнята до публікації 04.08.2026
Опублікована 28.10.2026

SYNTHESIS, PROPERTIES, AND APPLICATIONS OF FATTY ACID AMIDES: A REVIEW

D.G. Filinskyi* *, O.V. Chervakov, K.Ye. Varlan

Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine

* **e-mail: filinskyi.dmytro@gmail.com**

The article presents a comprehensive review of the current state of scientific research in the synthesis, evaluation of properties, and practical applications of fatty acid amides as promising multipurpose oleochemical products. Trends in the chemical industry's transition toward renewable plant- and animal-derived raw materials within the framework of the «green chemistry» concept are analyzed. Particular attention is paid to the chemical structure of fatty acid amides, which determines their unique amphiphilic, colloid-chemical, and thermophysical properties. Methods for synthesizing amides from various fat- and oil-based feedstocks are analyzed. Data on the multiple applications of fatty acid amides as environmentally safe biodegradable surfactants, plasticizers, corrosion inhibitors, rubber and bitumen modifiers, functional additives for paints and coatings, and innovative phase-change thermal energy storage materials are systematized. The paper outlines promising research avenues to facilitate the further development of the synthesis and application of fatty acid amides.

Keywords: oleochemistry; fatty acid amides; renewable feedstock; functional materials; synthesis; properties.

REFERENCES

1. Chervakov OV, Chervakov DO, Sukhyi KM, Kuzminskyi VY, Varlan KY, Belyanovskaya EA, et al. Oleochemical products in synthesis technologies of eco-friendly polymers. *J Chem Technol.* 2024; 32(4): 969-992. doi: 10.15421/jchemtech.v32i4.309194.

2. Cholifah U, Nafiunisa A, Aryanti N, Wardhani DH. The influence of cocamide DEA towards the characteristics of transparent soap. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng.* 2021; 1053: 012016. doi: 10.1088/1757-899X/1053/1/012016.

3. Opsahl R. Amides, fatty acid. In: *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. 2000; 2: 442-463. doi: 10.1002/0471238961.0113090415161901.a01.

4. Filinska TG, Chervakov OV, Filinska AO. Roslynni olii. Dovidnyk [Vegetable oils. Handbook]. Dnipro: State Higher Educational Institution «Ukrainian State Chemical and Technological University»; 2015. 425 p. (*in Ukrainian*).

5. Abel-Anyebe O, Ekpenyong KI, Eseyin A. A novel synthetic route to fatty amides in non-aqueous reaction of fatty esters with ammonium salts and methyl amine. *Int J Chem.* 2013; 5(1): 80-86. doi: 10.5539/ijc.v5n1p80.

6. Charville H, Jackson DA, Hodges G, Whiting A, Wilson MR. The uncatalyzed direct amide formation reaction – mechanism studies and the key role of carboxylic acid H-bonding. *Eur J Org Chem*. 2011; 2011(30): 5981-5990. doi: 10.1002/ejoc.201100714.

7. de Figueiredo RM, Suppo JS, Campagne JM. Nonclassical routes for amide bond formation. *Chem Rev.* 2016; 116(19): 12029-12122. doi: 10.1021/acs.chemrev.6b00237.

8. Muramatsu W, Manthena C, Nakashima E, Yamamoto H. Peptide bond-forming reaction via amino acid silyl esters: new catalytic reactivity of an aminosilane. *ACS Catal.* 2020; 10(16): 9594-9603. doi: 10.1021/acscatal.0c02512.

9. Handoko, Panigrahi NR, Arora PS. Two-component redox organocatalyst for peptide bond formation. *J Am Chem Soc.* 2022; 144(8): 3637-3643. doi: 10.1021/jacs.1c12798.

10. Lundberg H, Tinnis F, Adolfsson H. Direct amide coupling of non-activated carboxylic acids and amines catalysed by zirconium(IV) chloride. *Chem Eur J*. 2012; 18(13): 3822-3826. doi: 10.1002/chem.201104055.

11. Allen CL, Chhatwal AR, Williams JMJ. Direct amide formation from unactivated carboxylic acids and amines. *Chem Commun*. 2012; 48(5): 666-668. doi: 10.1039/c1cc15210f.

12. Tsuji H, Yamamoto H. Hydroxy-directed amidation of carboxylic acid esters using a tantalum alkoxide catalyst. *J Am Chem Soc*. 2016; 138(43): 14218-14221. doi: 10.1021/jacs.6b09482.

13. Maki-Arvela P, Zhu J, Kumar N, Eranen K, Aho A, Linden J, et al. Solvent-free «green» amidation of stearic acid for synthesis of biologically active alkylamides over iron supported heterogeneous catalysts. *Appl Catal A Gen*. 2017; 542: 350-358. doi: 10.1016/j.apcata.2017.06.006.

14. Ojeda-Porras A, Hernandez-Santana A, Gamba-Sanchez D. Direct amidation of carboxylic acids with amines under microwave irradiation using silica gel as a solid support. *Green Chem*. 2015; 17(5): 3157-3163. doi: 10.1039/c5gc00189g.

15. Wang MY, Gang HZ, Zhou L, Liu JF, Mu BZ, Yang SZ. A high yield method for the direct amidation of long-chain fatty acids. *Int J Chem Kinet*. 2020; 52(2): 99-108. doi: 10.1002/kin.21334.

16. Awasthi NP, Upadhayay SK, Singh RP. Kinetic investigation of erucamide synthesis using fatty acid and urea. *J Oleo Sci.* 2008; 57(9): 471-475. doi: 10.5650/jos.57.471.

17. Masyithah Z, Syukri M, Ashari M, Annisa N, Ginting A. Optimizing process condition for amidification of stearic acid and urea using response surface methodology. *Rasayan J Chem*. 2020; 13(2): 868-875. doi: 10.31788/RJC.2020.1325258.

18. Nengroo ZR, Ahmad A, Tantary A, Ganie AS, Shah ZU. Design and synthesis of fatty acid derived 4-methoxybenzylamides as antimicrobial agents. *Heliyon*. 2021; 7(4): e06842. doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e06842.

19. Awasthi NP, Singh RP. Lipase-catalyzed synthesis of fatty acid amide (erucamide) using fatty acid and urea. *J Oleo Sci.* 2007; 56(10): 507-509. doi: 10.5650/jos.56.507.

20. Abel-Anyebe O, Idris N, Keita D, Ekpenyong KI, Yakubu MA. Fatty amides in minutes: direct formation from fatty esters in a green synthetic process. *Sci J Anal Chem*. 2020; 8(1): 18-28. doi: 10.11648/j.sjac.20200801.14.

21. Kumar D, Park CH, Kim CS. Sustainable heterogeneously catalyzed single-step and two-step amide derivatives of non-edible natural triglycerides as dual-functional diesel fuel additives. *Ind Crops Prod*. 2020; 158: 113001. doi: 10.1016/j.indcrop.2020.113001.

22. Anastopoulos G, Schinas P, Zannikou Y, Komiotou M, Zannikos F, Karonis D. Impact of N,N-bis(2-ethoxyethyl) fatty acid amides on the lubrication performance of kerosene fuel F-34 for use in CI engines. *Fuels*. 2023; 4: 19-32. doi: 10.3390/fuels4010002.

23. Anastopoulos G, Kaligeros S, Schinas P, Zannikou Y, Karonis D, Zannikos F. The impact of fatty acid diisopropanolamides on marine gas oil lubricity. *Lubricants*. 2017; 5: 28. doi: 10.3390/lubricants5030028.

24. Anastopoulos G, Schinas P, Zannikou Y, Karonis D, Zannikos F, Lois E. Investigation of the effectiveness of monoethanolamides as low sulfur marine fuel lubricity additives. *Mater Today Proc*. 2018; 5: 27563-27571. doi: 10.1016/j.matpr.2018.09.076.

25. Meira M, Ferrer TM, Luna S, Catarino FBS, Moreira LB, Silva CL, et al. Solvent-free synthesis of fatty acid amides and evaluation of their usability as alternative biodiesel fuel additives. *Braz J Chem Eng*. 2026. doi: 10.1007/s43153-026-00681-5.

26. Abed KM, Mohsen OA, Al-Issawi AG, Faraj MW, Al-Shuwaiki NM, Rahman SA, et al. A novel amide corrosion inhibitor derived from waste cooking oil for mild steel in hydrochloric acid. *Sci Rep*. 2025; 15: 41625. doi: 10.1038/s41598-025-25602-3.

27. Onyskiv IM, Romanchuk VV, Topilnytskyi PI. Doslidzhennya zakhysnykh vlastyvostey inhibitoryv koroziyi, oderzhanykh z vidnovlyuvanoyi syrovyny [Research on the protective properties of corrosion inhibitors obtained from renewable raw materials]. *Bull Natnl Univ «Lviv Polytechnic» Ser Chem Technol Subst Appl*. 2017; (868): 165-171.

28. Zheng Y, Martinez CJ, Youngblood JP. Synthesis and characterization of long-chain (C20 ~ C48) fatty acid amides (FAAms) from soybean oil and alkyl amines for phase change material applications. *J Appl Polym Sci*. 2023; 140(46): e54675. doi: 10.1002/app.54675.

29. Betancourt-Jimenez D, Youngblood JP, Martinez CJ. Synthesis and characterization of fatty acid amides from commercial vegetable oils and primary alkyl amines for phase change material applications. *ACS Sustainable Chem Eng*. 2020; 8(36): 13683-13691. doi: 10.1021/acssuschemeng.0c03626.

30. Safronov OI, Papeikin OO, Venher IO, Bodachivska LY. Vykorystannya amidaminiv oliy v yakosti prysadok do mastylnykh materialiv [Application of amideamines of vegetable oils as additives to lubricants]. *Odesa National University Herald. Chemistry*. 2018; 23(3): 29-39. (*in Ukrainian*). doi: 10.18524/2304-0947.2018.3(67).134804.

31. Chervakov OV, Filinska TG, Kopyton VO. Sposoby pereeterifikatsii zhirosoderzhashchego syrya metodom alkogoliza [Methods of transesterification of fatty raw materials by alcoholysis]. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2009; (4): 72-79. (*in Ukrainian*).

32. El-Baz HA, Elazzazy AM, Saleh TS, Dritsas P, Mahyoub JA, Baeshen MN, et al. Single cell oil (SCO)-based bioactive compounds: I—enzymatic synthesis of fatty acid amides using SCOs as acyl group donors and their biological activities. *Appl Biochem Biotechnol*. 2021; 193(3): 822-845. doi: 10.1007/s12010-020-03450-3.

33. Khalkar S, Bhowmick D, Pratap A. Synthesis and effect of fatty acid amides as friction modifiers in petroleum base stock. *J Oleo Sci*. 2013; 62(11): 901-904. doi: 10.5650/jos.62.901.

34. Zhang L, Wang XJ, Wang J, Grinberg N, Krishnamurthy DK, Senanayake CH. An improved method of amide synthesis using acyl chlorides. *Tetrahedron Lett*. 2009; 50(24): 2964-2966. doi: 10.1016/j.tetlet.2009.03.220.

35. Ni R, Bhandari S, Mitchell PR, Suarez G, Patel NB, Lamb K, et al. Synthesis, quantification, and characterization of fatty acid amides from in vitro and in vivo sources. *Molecules*. 2021; 26: 2543. doi: 10.3390/molecules26092543.

36. Farrell EK, Chen Y, Barazanji M, Jeffries KA, Cameroamortegui F, Merkler DJ. Primary fatty acid amide metabolism: conversion of fatty acids and an ethanolamine in N18TG2 and SCP cells. *J Lipid Res*. 2012; 53(2): 247-256. doi: 10.1194/jlr.M018606.

37. Xu X, Yang F, Yang H, Zhao Y, Sun X, Tang Y. Preparation and tribological behaviors of sulfur- and phosphorus-free organic friction modifier of amide—ester type. *Lubricants*. 2024; 12: 196. doi: 10.3390/lubricants12060196.

38. Gallez B, Demeure R, Debuyst R, Leonard D, Dejehet F, Dumont P. Evaluation of nonionic nitroxyl lipids as potential organ-specific contrast agents for magnetic resonance imaging. *Magn Reson Imaging*. 1992; 10(3): 445-455. doi: 10.1016/0730-725x(92)90516-3.

39. Chen X, Yang J, Yasuda K, Koga N, Zhang H. Adsorption behavior of TEMPO-based organic friction modifiers during sliding between iron oxide surfaces: a molecular dynamics study. *Langmuir*. 2022; 38(10): 3170-3179. doi: 10.1021/acs.langmuir.1c03203.

40. Hou J, Tsukamoto M, Hor S, Chen X, Yang J, Zhang H, et al. Molecules with a TEMPO-based head group as high-performance organic friction modifiers. *Friction*. 2023; 11: 316-332. doi: 10.1007/s40544-022-0610-0.

41. Hu M, Ma R, Zhang S, Han Y, Zhao J, Zhang M, et al. Preparation and tribological study of novel amide-based organic friction modifiers. *Tribol Int*. 2024; 194: 109465. doi: 10.1016/j.triboint.2024.109465.

42. Drabik J, Korasiak K, Chrobak J, Kozdrach R, Woch J, Cyl M, et al. Amide-based anti-wear/extreme-pressure additives for silica-thickened greases: structure and wear resistance. *Molecules*. 2025; 30: 2492. doi: 10.3390/molecules30122492.

43. Elsharif AM, Abubshait SA, Abdulazeez I, Abubshait HA. Synthesis of a new class of corrosion inhibitors derived from natural fatty acid: 13-docosenoic acid amide derivatives for oil and gas industry. *Arab J Chem*. 2020; 13(5): 5363-5376. doi: 10.1016/j.arabjc.2020.03.015.

44. Rajput SD, Hundiwale DG, Mahulikar PP, Gite VV. Fatty acids based transparent polyurethane films and coatings. *Prog Org Coat*. 2014; 77(9): 1360-1368. doi: 10.1016/j.porgcoat.2014.04.030.

45. Ali OAA, Al Shareef HF, Felaly R, El-Sawy MM. Synthesis and characterisation of new modified polyesteramide resins based on sunflower oil for anticorrosive protective coatings. *Sci Rep*. 2025; 15: 32265. doi: 10.1038/s41598-025-07062-x.

46. Shaik MR, Alam M, Alandis NM. Development of castor oil based poly(urethane-esteramide)/TiO_2 nanocomposites as anticorrosive and antimicrobial coatings. *J Nanomater*. 2015; 2015: 745217. doi: 10.1155/2015/745217.