

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-344-353](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-344-353)

УДК 628.477; 661.185

**Олег Олександрович Лозовий¹, Вікторія Петрівна Плаван²,
Сергій Сергійович Титаренко³, Олена Анатоліївна Охмат⁴,
Євген Юрійович Зайцев⁵, Олена Анатоліївна Крюкова⁶**

¹аспірант кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження

Київський національний університет технологій і дизайну (Київ, Україна)

E-mail: o.lozovoy@biosphere-corp.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0001-2228-9058>

²доктор технічних наук, професор завідувачка кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження

Київський національний університет технологій і дизайну (Київ, Україна)

E-mail: plavan.vp@knutd.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9559-8962>

ResearcherID: [I-5852-2015](https://orcid.org/0000-0001-9559-8962). **SCOPUS Author ID:** [6603130130](https://orcid.org/0000-0001-9559-8962)

³аспірант кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження

Київський національний університет технологій і дизайну (Київ, Україна)

E-mail: tytarenko.ss@knutd.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-6307-4482>

⁴кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри біотехнології шкіри а хутра

Київський національний університет технологій і дизайну (Київ, Україна)

E-mail: oxmat.aa@knutd.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0927-8706>

Scopus Author ID: [57194089217](https://orcid.org/0000-0003-0927-8706)

⁵магістрант кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження

Київський національний університет технологій і дизайну (Київ, Україна)

E-mail: ktpthv@knutd.edu.ua

⁶кандидат технічних наук, доцент кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження

Київський національний університет технологій і дизайну (Київ, Україна)

E-mail: kryukova.aa@knutd.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8638-3580>

SCOPUS Author ID: [24335433200](https://orcid.org/0000-0001-8638-3580)

ВИБІР ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ В ТЕХНОЛОГІЯХ МЕХАНІЧНОГО РЕЦИКЛІНГУ ПОЛІЕТИЛЕНУ

Стаття присвячена вибору мийних засобів для застосування в технологіях механічного рециклінгу поліетилену. На основі визначення властивостей поверхнево-активних речовин різного типу можна рекомендувати продукт Disponil® ENS 47 для мийки забруднених органічними домішками (рештками харчових продуктів) відходів поліетиленової плівки. Яскраво виражені лужні властивості цього продукту забезпечать швидке омилення жирів, а невисока здатність до піноутворення робить його придатним для застосування в комерційних мийних лініях. Найнижча температура в точці помутніння для Plurafac® SLF 180 дає можливість ефективного застосування цього продукту в низькотемпературних мийних лініях. Висока мийна здатність продукту Plurafac® LF 120 дає підстави рекомендувати цей продукт для мийки сильнозабруднених відходів поліетиленової плівки в технологіях механічного рециклінгу, зокрема при підвищеній температурі.

Ключові слова: поверхнево-активні речовини; механічний рециклінг; відходи поліетилену; мийна здатність.

Рис.: 1. Табл.: 1. Бібл.: 16.

Актуальність теми дослідження. Двигуном економічного зростання в багатьох країнах стало широке застосування пластмас, головним чином завдяки їхній легкості, регульованим властивостям, довговічності та простоті обробки, що зумовило широкий спектр їх використання [1]. 5 вересня 2024 року відзначався День перевищення обсягів пластикових відходів, коли світові пластикові відходи перевищують світові можливості управління ними. Наразі 66 % населення світу проживає в районах, де обсяги пластикових відходів перевищують місцеві можливості управління ними. У 2024 році у світі було утворено понад 400 мільйонів тонн пластикових відходів. Тільки близько 10 % відходів було перероблено [2]. Майже половина відходів була утилізована на звалищах, а решта були просто спалені або викинуті в навколишнє середовище через засмічення чи незаконне скидання відходів [3].

Постановка проблеми. Перш ніж розпочати переробку полімерних матеріалів, важливо спочатку перетворити відходи на нову сировину. Цей процес починається після збору відходів і налічує кілька етапів, включаючи сортування, очищення (мийку), подрібнення, пресування та повторну переробку, не змінюючи хімічної структури полімерів (рис. 1). Механічний рециклінг зазвичай використовується для переробки однотипних пластикових відходів, з таких полімерів, як поліпропілен, поліетилен, поліетилентерефталат, полістирол та інші.

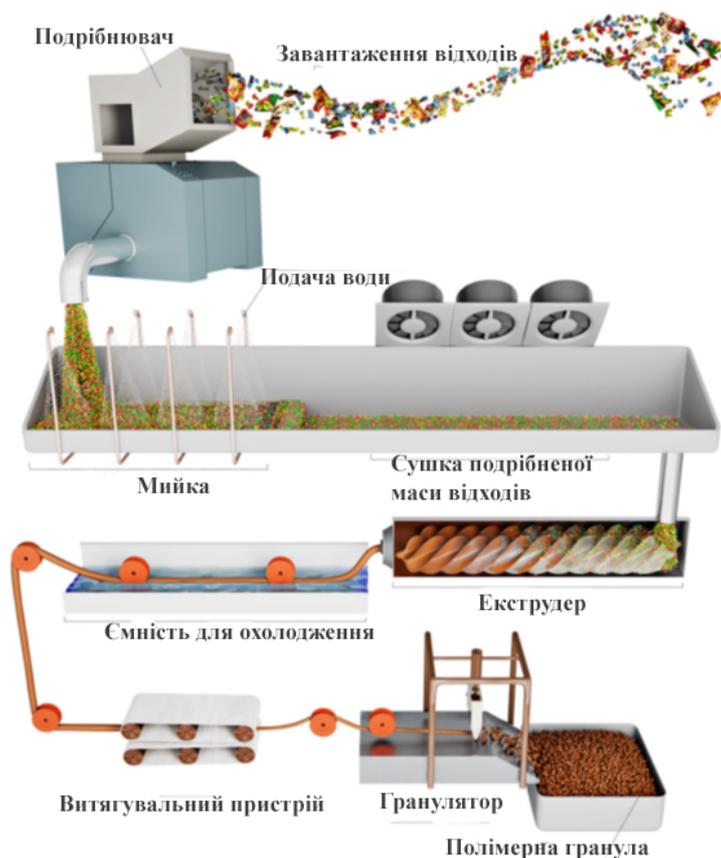


Рис. 1. Схематичне зображення процесу механічного рециклінгу
Джерело: розроблено авторами [1].

Під час механічного рециклінгу пластикових відходів надзвичайно важливим кроком є процес очищення [1]. Домішки можуть призвести до погіршення якості переробленого продукту та негативно вплинути на його ринкову вартість. Забруднювачі загалом класифікуються на навмисно додані речовини (НР) та ненавмисно додані речовини (ННР). Як впливає з назви, НР додаються до пластику для покращення його фізико-хімічних властивостей. Ці речовини серед інших включають низку добавок, таких як антипірени, пластифікатори та стабілізатори [4]. Забруднювачі ННР можуть включати зовнішні сторонні частинки, такі як бруд, жир, харчові відходи або побічні продукти їх розпаду. Дотримання промислових стандартів для застосувань з високим попитом, таких як упаковка, є складним завданням через ускладнення, що виникають через колір, запах та міграцію неідентифікованих органічних речовин [5]. Для зменшення кількості забруднюючих речовин використовувалися різні методи очищення, такі як екстракція за допомогою поліетиленгліколю, екстракція гарячою водою з гідроксидом натрію, екстракція субкритичною водою, окислення ультрафіолетовим випромінюванням та поглиблене окислення з використанням ультрафіолетового випромінювання з H_2O_2 [6]. Після збору пластикові відходи

проходять попереднє промивання в резервуарі для видалення поверхневих важких домішок. Крім того, гаряча вода або стиснене повітря ефективно видаляють жирне сміття та наклейки. Пахучі компоненти пластикових відходів частково видаляються за допомогою промивки каустичною содою, тоді як для видалення найбільш неполярних компонентів потрібні органічні розчинники та мийні засоби [7-8]. Мийні засоби також використовуються під час процесу механічного очищення для досягнення повної деконтамінації.

Поліетиленові (ПЕ) плівки становлять найбільшу частку гнучкої упаковки, однак їх механічний рециклінг ускладнюється високою контамінацією побутовими/ харчовими залишками, адгезивами, друкарськими фарбами, клеями, а також вологою й тонкодисперсними твердими домішками, що знижує вихід і якість грануляту та обмежує сфери повторного застосування. У промислових лініях очищення ПЕ-плівки критичною є мийна стадія з використанням поверхнево-активних речовин (ПАР), мета яких — знизити поверхневий натяг, поліпшити змочуваність і солюбілізацію органічних забруднювачів, диспергувати тверді частки та сприяти їх видаленню без пошкодження полімерної матриці. Правильний вибір складу ПАР, температури, рН і тривалості миття безпосередньо впливає на колірну стабільність, леткі домішки/запах, реологію розплаву та механічні властивості вторинного ПЕ, а також на економіку процесу через витрати на воду й очищення стоків. З огляду на зростання ринку вторинних плівок і вимог до якості, оптимізація саме мийно-очисних операцій із застосуванням ПАР є ключем до підвищення товарності рециклата з ПЕ-плівок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Автори [1] розглядають роль ПАР у мийному контурі. ПАР у лужних/нейтральних мийних ваннах забезпечують змочування ПЕ-плівки, емульгування жирів/олій, десорбцію фарб і клеїв та стабілізацію зважених речовин; оптимальні умови включають підвищення температури, контроль рН та концентрацію ПАР вище критичної концентрації міцелоутворення, що підвищує швидкість і повноту деконтамінації без надмірної деградації полімеру. Дослідження ефективності миття для різних полімерів, включно з поліетиленом низького тиску, показують зростання вилучення слабополярних забруднювачів із підвищенням температури й часу; використання лугів/детергентів може покращувати видалення полярних компонентів, але потребує контролю, аби уникати небажаних змін маси/летких фракцій і появи запахів.

Автори [3] пропонують конфігурацію мийної установки для дослідження параметрів мийного процесу для різних видів пластику та рецептур, під час використання якої доходять висновків, що підвищення температури покращує мийний ефект.

Автори [9] за результатами огляду технологічних стратегій для переробки «брудних» ПЕ-плівок роблять висновок про те, що інтенсифіковані мийні/флотаційні схеми з детергентами забезпечують істотне зменшення залишкових органічних домішок і фарб, тоді як просте водне миття є недостатнім; водночас надмірна лужність і тривале миття можуть призводити до небажаних змін у масі зразка через можливу деструкцію, що потребує балансу між чистотою і збереженням властивостей. Практичний висновок – для ПЕ-плівок доцільні гарячі мийні ванни з ПАР і контрольованим лужним компонентом, з наступним ретельним полосканням, щоб мінімізувати залишковий вміст ПАР та вплив на запах/леткі речовини.

Автори [10] досліджують специфіку забруднень плівкових потоків. Аналітичні звіти для гнучких плівок у ЄС фіксують, що відсортовані тюки ПЕ-плівки містять значну частку не-ПЕ полімерів і забруднень: у побутових потоках вміст чистого ПЕ може бути $\leq 70\%$, у комерційних — близько 85% , в агроплівках — близько 50% , причому агроплівки містять ґрунт, органіку, вологу та залишки агрохімікатів; це прямо підвищує навантаження на мийні стадії і визначає потребу у ПАР для ефективного очищення. За таких умов вибір рецептур ПАР і режимів (температура, інтенсивність механічного впливу, тривалість) критично впливає на реальний вихід придатного рециклата та його колір/запах.

Автори [11] пропонують протоколи придатності до рециклінгу ПЕ-плівок і обмеження щодо хімії миття. Актуалізовані європейські протоколи оцінювання придатності до рециклінгу ПЕ-плівок (RecyClass REP-PEflex-01) детально регламентують лабораторну перевірку інноваційної упаковки з урахуванням реальних стадій передоброблення (миття, флотація, сушіння) та подальшої екструзії/видування, наголошуючи, що промислові мийні операції для ПЕ-плівок зазвичай використовують «м'які» умови та уникають агресивних реагентів, аби не погіршити якість рециклата і не ускладнювати очищення стоків. Це підкреслює необхідність відбору ПАР із доказовою ефективністю деінкіngu/видалення клеїв при помірних температурах і рН, сумісних зі стандартними лініями механічного рециклінгу ПЕ-плівок.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Сукупно наукові та галузеві джерела узгоджено демонструють: для поліетиленових плівок найвагоміший важіль підвищення якості рециклата — оптимізовані мийні схеми з ПАР, адаптовані до профілю забруднень і обмежень очисних споруд; це дозволяє підвищити вихід придатної фракції, стабілізувати колір/запах і покращити перероблюваність вторинного ПЕ. Тому правильний підбір мийних засобів та умов мийки полімерних відходів у процесі їх механічного рециклінгу залишається актуальним завданням для одержання якісного рециклату.

Мета цієї роботи – підбір мийних засобів для застосування в технологіях механічного рециклінгу поліетилену на основі визначення властивостей поверхнево-активних речовин різного типу.

Виклад основного матеріалу. Для досліджень використали серію продуктів Plurafac® (BASF, Німеччина), зокрема:

Plurafac® LF 120 (CAS No. 111905-52-3) – неіоногенна поверхнево-активна речовина, що складається з алкоксильованих, переважно нерозгалужених жирних спиртів і містить вищі алкеноксиди поряд з етиленоксидом. Дуже ефективний змочувальний агент. Розчиняється у воді та органічних розчинниках. Пропонується виробником для миття посуду, прання і прибирання.

Plurafac® LF 220 (CAS No. 111905-53-4) – суміш розгалужених та лінійних спиртів з довжиною ланцюга від 13 до 15 атомів вуглецю, до яких приєднані бутоксидні та етоксидні групи. Завдяки своїм властивостям може застосовуватися як основний ПАР у засобах для миття посуду в посудомийках та ополіскувачах, має хороші емульгуючі властивості, а також непогану змочувальну здатність.

Plurafac® LF 221 – неіоногенна поверхнево-активна речовина з низьким рівнем піноутворення, що складається з алкоксильованих, переважно нерозгалужених жирних спиртів і містить вищі алкеноксиди поряд з етиленоксидом. Пропонується виробником для миття посуду, прання і прибирання, для догляду за автомобілем.

Plurafac® SLF 180 (CAS No. 166736-08-9) – поверхнево-активна речовина з низьким піноутворенням. Внесена до списку безпечних хімічних інгредієнтів Агентства з охорони навколишнього середовища США (EPA). Підходить для низькотемпературного очищення.

Disponil® ENS 47 (CAS No. 126-92-1) – аніонна поверхнево-активна речовина, натрієва сіль 2-етилгексилсульфату, що використовується як емульгатор у виробництві полімерних емульсій, а також для посилення мийних властивостей у складах для очищення твердих поверхонь; підвищує змочувальну та проникну здатність мийних засобів, і може застосовуватися в різних галузях, від автохімії до промислового використання.

Придатність тих чи інших поверхнево-активних речовин для використання в технологіях механічного рециклінгу оцінювали шляхом визначення і порівняння вмісту активної миючої речовини, рН, здатності до піноутворення і піностійкості; також через визначення поверхневого натягу, точки помутіння і змочувальної здатності. Саме ці показники зазвичай беруться до уваги при розробці рекомендацій щодо застосування ПАР в технологіях механічного рециклінгу [12-13].

Якісна реакція на визначення природи поверхнево-активних речовин

У колбу вносять 1 мл досліджуваного розчину ПАР, кілька крапель індикатору метилового червоного та з бюретки додають розчин розведеної 1:3 хлоридної кислоти до зміни забарвлення розчину. Фіксують об'єм витраченої кислоти. У другу колбу відбирають 1 мл досліджуваного розчину ПАР, додають зафіксований об'єм кислоти, перемішують і додають 1 мл розчину реактиву – роданатокобальтату амонію.

Якщо в досліджуваному розчині ПАР присутня аніонактивна ПАР або взагалі це не ПАР, розчин у колбі забарвлюється в рожевий колір; катіонактивна ПАР – розчин у колбі стає мутним і забарвлюється в блакитний колір; неіоногенна ПАР – розчин у колбі забарвлюється в зеленкувато-блакитний або блакитний колір.

Визначення вмісту сухого залишку ПАР

У зважений бюкс на аналітичних вагах зважують наважку мийного засобу близько 10 г, висушують у сушильній шафі при температурі 85–90 °С до постійної маси. Вміст сухого залишку визначають за формулою, %:

$$x = \frac{a}{H} \cdot 100\%,$$

де a – маса сухої речовини після висушування бюкса, г; H – наважка ПАР, г.

Визначення вмісту активної мийної речовини

Близько 1 г мийного засобу, зваженого на технічних вагах, переносять у колбу на 250 мл, додають 20 мл спирту і кип'ятять суміш зі зворотним холодильником протягом 30 хвилин. Після відстоювання рідини, розчин фільтрують у колбу місткістю 250–300 мл. Залишок у першій колбі оброблюють спиртом у кількості 10–15 мл ще два рази, кожного разу зливаючи через фільтр у ту ж саму колбу. Потім фільтрат переносять у доведену до постійної маси колбу і спирт відганяють. Колбу сушать при 80–90 °С до постійної маси. Вміст активної мийної речовини розраховують за формулою:

$$x = \frac{a}{H} \cdot 100\%,$$

де a – маса висушеного залишку, г; H – наважка мийного засобу, г.

Визначення рН розчину ПАР

рН розчинів ПАР визначали відповідно до ДСТУ EN 1262:2007 «Речовини поверхнево-активні. Метод визначання рН розчинів чи дисперсій». Готують 200 мл 1%-вого водного розчину ПАР з урахуванням вмісту сухого залишку. Для цього спочатку в стакані розчиняють наважку ПАР у 50 мл теплої (40–45 °С) дистильованої води, потім цей розчин необхідно перенести в мірну колбу на 100 мл, кілька разів змити стінки стакана дистильованою водою, причому промивні води також додати у мірну колбу. Об'єм розчину доводять до мітки й ретельно перемішують. З одержаного розчину відбирають пробу і визначають рН розчину потенціометричним методом.

Дослідження піноутворення і піностійкості розчину ПАР

Дослідження піноутворення і піностійкості розчинів поверхнево-активних речовин (ПАР) регламентує ДСТУ EN 13996:2009 «Речовини поверхнево-активні. Здатність і нездатність до піноутворення. Метод перемішування з використанням турбіни».

200 мл 1% розчину ПАР влийте через лійку в мірний циліндр (об'ємом 500 мл з ціною поділки – 1 мл) так, щоб струмінь мильного розчину не потрапляв на стінки циліндра. Відразу після виливання всього розчину зафіксуйте верхній рівень піни й верхній рівень розчину, що залишився під піною. Різниця цих показників характеризує піноутворення (Π_1 у мл). Залиште циліндр з таким вмістом у спокійному стані на 5 хвилин, потім проведіть аналогічні розрахунки для визначення показника Π_2 . Піностійкість ($\Pi_{ст}$) розраховують за формулою:

$$\Pi_{ст} = \frac{\Pi_2}{\Pi_1} \cdot 100\%.$$

Визначення поверхневого натягу ПАР

Величину поверхневого натягу досліджуваних ПАР визначали відповідно до ДСТУ EN 14370:2012 «Речовини поверхнево-активні. Методи визначення поверхневого натягу». Для визначення поверхневого натягу готують розчини ПАР з концентрацією 0,25–0,5 % (у розрахунку на вміст сухої речовини). Поверхневий натяг досліджуваного розчину τ_1 визначають таким чином: спочатку підраховують число крапель при витіканні дистильованої води N_0 , а потім число крапель при витіканні досліджуваного розчину N_1 . Поверхневий натяг розраховують за формулою:

$$\tau_1 = \frac{\tau_0 N_0 D_1}{N_1 D_0},$$

де τ_0 – поверхневий натяг води, дорівнює 72,75 дин/см; N_0 – число крапель води; N_1 – число крапель досліджуваного розчину; D_0 – густина води, дорівнює 1 г/см³; D_1 – густина досліджуваної речовини, г/см³.

Визначення змочувальної здатності ПАР

Змочувальну здатність ПАР визначали методом занурювання за ДСТУ ISO 8022:2006 «Поверхнево-активні речовини. Визначення змочувальної здатності методом занурювання». Готують 100 мл розчину ПАР з концентрацією 0,5 г/л. Із сукна вирізують зразки діаметром 3 см і на добу вміщують їх в ексікатор з хлористим кальцієм. Приготовлений розчин ПАР наливають у плоскодонні ємності діаметром 8–10 см і висотою 6–8 см. У ємності по черзі кладуть зразки сукна з одночасним запуском секундоміра. Після падіння зразка на дно ємності секундомір зупиняють. Змочувальна здатність ПАР характеризується середньоарифметичною тривалістю занурення усіх зразків. Допускається відхилення ± 10 %.

Визначення точки помутніння ПАР

Точка помутніння — це верхня температурна межа, за якої неіоногенні поверхнево-активні речовини (ПАР) починають випадати в осад, утворюючи каламуть. Вона пов'язана з припиненням міцелоутворення. В області температури помутніння спостерігається підвищена взаємна розчинність контактуючих рідких фаз, а в емульсійних системах має місце інверсія фаз. Цей показник визначали відповідно до ДСТУ EN 1890:2008. Речовини поверхнево-активні. Метод визначення точки помутніння неіоногенних поверхнево-активних речовин, одержуваних конденсацією етиленоксиду.

Результати досліджень та їх обговорення. За результатами досліджень (табл. 1), поверхнево-активні речовини серії Plurafac® характеризуються високим вмістом активної мийної речовини, на відміну від продукту Disponil® ENS 47, що забезпечить високу ефективність їх застосування за менших витрат. Поверхнево-активні речовини серії Plurafac® демонструють відмінні змочувальні властивості, кращі змочувальні властивості має продукт Plurafac® LF 120, що корелює з найнижчим значенням поверхневого натягу ПАР. Відповідно продукт Disponil® ENS 47, який має найвище значення показника поверхневого натягу, характеризується найгіршою змочувальною здатністю. Продукти Plurafac® SLF 180 і Disponil® ENS 47 характеризуються невисоким піноутворенням, тому можуть рекомендуватися для застосування в комерційних мийних лініях. Найнижча температура в точці помутніння для Plurafac® SLF 180 дає можливість ефективного застосування цього продукту в низькотемпературних мийних лініях.

У літературі часто повідомляється про використання гідроксиду натрію та деяких рідких мийних засобів для видалення домішок [14–15] однак використання цих продуктів за певних умов очищення може призвести до деградації полімерів. Одночасне застосування гідроксиду натрію і рідких мийних засобів демонструє ефективність у видалення харчових органічних домішок із пластикової упаковки [16]. Зазвичай, рідкі мийні засоби, що використовуються в процесах очищення пластику після споживання, являють собою суміші тензоактивних агентів, функція яких полягає у зниженні поверхневого натягу розчину, що дозволяє емульгуватися оліям та жирам.

Таблиця 1 – Результати дослідження властивостей поверхнево-активних речовин

Показник	Тип продукту				
	Plurafac® LF 120	Plurafac® LF 220	Plurafac® LF 221	Plurafac® SLF 180	Disponil® ENS 47
Консистенція ПАР, зовнішній вигляд	Не густа, прозора	Сиропоподібна, прозора	Не густа, прозора	Доволі густа, прозора	Рідка, прозора
Колір	Безбарвна	Блідо-кремовий	Безбарвна	Безбарвна	Світло-жовтий
Запах	Хімічний	Хімічний	Слабко-хімічний	Слабко-хімічний	Хімічний «Мильний»
Питома вага, г/см ³	1,029	1,106	1,088	1,088	1,061
Тип ПАР	неіоногенні				аніонна
Сухий залишок, %	98,0	94,3	94,3	98,8	45,2
Вміст активної мийної речовини, %	97,8	94,3	93,4	97,7	44,2
pH вихідного продукту	5,5	7,3	7,5	8,0	12,8
pH розчину ПАР	5,2	5,7	6,3	6,0	11,1
Піноутворення, мл	90	90	95	50	60
Піностійкість, %	11,1	33,3	15,8	10,0	33,3
Поверхневий натяг ПАР	27,98	30,31	31,83	32,64	70,73
Змочувальна здатність, с	2,5	3,5	2,9	3,8	23,7
Точка помутніння, °C	48	52	48	18	–

Джерело: розроблено авторами.

У зв'язку з цим, застосування Disponil® ENS 47 може бути ефективним у процесі мийки відходів, оскільки саме цей продукт має яскраво виражені лужні властивості, про що свідчить високе значення рН. Відповідно проявлятиме хорошу емульгуючу здатність для видалення харчових домішок з полімерних відходів. Також може рекомендуватися для посилення мийної здатності інших ПАР.

Висновки. Таким чином, на основі визначення властивостей поверхнево-активних речовин різного типу для застосування в технологіях механічного рециклінгу поліетилену можна рекомендувати продукт Disponil® ENS 47 для миття забруднених органічними домішками (рештками харчових продуктів) відходів поліетиленової плівки. Яскраво виражені лужні властивості цього продукту забезпечать швидке омилення жирів, а не висока здатність до піноутворення робить його придатним для застосування в комерційних мийних лініях. Найнижча температура в точці помутніння для Plurafac® SLF 180 дає можливість ефективного застосування цього продукту в низькотемпературних мийних лініях. Висока мийна здатність продукту Plurafac® LF 120 дає підстави рекомендувати цей продукт для мийки сильнозабруднених відходів поліетиленової плівки в технологіях механічного рециклінгу, зокрема при підвищеній температурі.

Правильний вибір складу ПАР, температури, рН і тривалості миття забезпечить колірну стабільність, потрібну реологію розплаву та механічні властивості вторинного ПЕ без сторонніх домішок і запахів. Це сприятиме розширенню сфери застосування вторинного грануляту.

Список використаних джерел

1. Sambyal, P., Najmi, P., Sharma, D., Khoshbakhti, E., Hosseini, H., Milani, A. S., & Arjmand, M. (2025). Plastic recycling: Challenges and opportunities. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 103(8), 2462–2498. <https://doi.org/10.1002/cjce.25531>.
2. OECD. (2022). *Global plastics outlook: Policy scenarios to 2060*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/aa1edf33-en>.

3. Kruta, K., et al. (2023). Effect of different washing conditions on the removal of volatile organic compounds from polymers including LDPE. *Clean Technologies and Recycling*, 3(3), 134–147. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol303008>.
4. Wagner, S., & Schlummer, M. (2020). Plastic recycling: Technological and economic aspects. *Resources, Conservation and Recycling*, 158, Article 104800. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104800>.
5. Ibarra, V. G., De Quirós, A. R. B., Losada, P. P., & Sendón, R. (2019). Migration of substances from multilayer plastic packaging and deinking of recycled polymer films. *Food Packaging and Shelf Life*, 21, Article 100325. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100325>.
6. Núñez, S. S., Conesa, J. A., Molto, J., & Fullana, A. (2023). Characterization and valorization of plastic waste from municipal solid waste. *Resources, Conservation and Recycling*, 195, Article 107017. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107017>.
7. Roosen, M., De Somer, T., Demets, R., Ügdüler, S., Meesseman, V., Van Gorp, B., Ragaert, K., Van Geem, K. M., Walgraeve, C., & Dumoulin, A. (2021). Circular business models for plastic waste: Technical possibilities and barriers. *Waste Management*, 120, 564–576. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.10.017>.
8. Strangl, M., Ortner, E., Fell, T., Ginzinger, T., & Buettner, A. (2020). Odour profile changes of recycled polyethylene (PE) during storage. *Journal of Cleaner Production*, 260, Article 121104. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121104>.
9. Soto, J. M., Martínez-Salvador, A., et al. (2020). Novel pre-treatment of dirty post-consumer polyethylene film: Washing process assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, Article 104946. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104946>.
10. Plastics Recyclers Europe, & Eunomia. (2020). *Flexible films market in Europe: State of play* (52 p.). Plastics Recyclers Europe. <https://www.plasticsrecyclers.eu/wp-content/uploads/2022/10/flexible-films-market.pdf>.
11. Yang, M., Jiang, X., Xiang, X., Qu, P., & Zhu, M. (2025). Recent developments in recycling of post-consumer polyethylene waste. *Green Chemistry*, 27(15), 3900–3948. <https://doi.org/10.1039/D4GC06566B>.
12. Azarmi, R., & Ashjarian, A. (2015). Type and application of some common surfactants. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 7(2), 632–640. <https://www.jocpr.com/articles/type-and-application-of-some-common-surfactants.pdf>.
13. Das, R., et al. (2024). A comprehensive review on the creation, description, and recent advances in the utilization of biobased polyhydroxy surfactants. *Journal of Chemistry*, 2024, Article 6120535. <https://doi.org/10.1155/2024/6120535>.
14. RecyClass. (2025). *Recyclability evaluation protocol for PE films (REP-PEflex-01)* (Version 6.0). Plastics Recyclers Europe/RecyClass. <https://recyclclass.eu/wp-content/uploads/2025/01/REP-PEflex-001-v.6.0.pdf>.
15. Santos, A. S. F., Santana, R. M. C., Agnelli, J. A. M., & Manrich, S. (2001). Characterization of low-density polyethylene after recycling. *Polymer Recycling*, 6(2), 57–68.
16. Santana, R. M. C., & Gondim, G. (2009). Influence of cleaning conditions on the degradation of recycled HDPE. *Journal of Applied Polymer Science*, 112(3), 1454–1460. <https://doi.org/10.1002/app.29479>.

References

1. Sambyal, P., Najmi, P., Sharma, D., Khoshbakhti, E., Hosseini, H., Milani, A. S., & Arjmand, M. (2025). Plastic recycling: Challenges and opportunities. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 103(8), 2462–2498. <https://doi.org/10.1002/cjce.25531>.
2. OECD. (2022). *Global plastics outlook: Policy scenarios to 2060*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/aa1edf33-en>.
3. Kruta, K., et al. (2023). Effect of different washing conditions on the removal of volatile organic compounds from polymers including LDPE. *Clean Technologies and Recycling*, 3(3), 134–147. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol303008>.

4. Wagner, S., & Schlummer, M. (2020). Plastic recycling: Technological and economic aspects. *Resources, Conservation and Recycling*, 158, Article 104800. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104800>.
5. Ibarra, V. G., De Quirós, A. R. B., Losada, P. P., & Sendón, R. (2019). Migration of substances from multilayer plastic packaging and deinking of recycled polymer films. *Food Packaging and Shelf Life*, 21, Article 100325. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100325>.
6. Núñez, S. S., Conesa, J. A., Molto, J., & Fullana, A. (2023). Characterization and valorization of plastic waste from municipal solid waste. *Resources, Conservation and Recycling*, 195, Article 107017. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107017>.
7. Roosen, M., De Somer, T., Demets, R., Ügdüler, S., Meesseman, V., Van Gorp, B., Ragaert, K., Van Geem, K. M., Walgraeve, C., & Dumoulin, A. (2021). Circular business models for plastic waste: Technical possibilities and barriers. *Waste Management*, 120, 564–576. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.10.017>.
8. Strangl, M., Ortner, E., Fell, T., Ginzinger, T., & Buettner, A. (2020). Odour profile changes of recycled polyethylene (PE) during storage. *Journal of Cleaner Production*, 260, Article 121104. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121104>.
9. Soto, J. M., Martínez-Salvador, A., et al. (2020). Novel pre-treatment of dirty post-consumer polyethylene film: Washing process assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, Article 104946. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104946>.
10. Plastics Recyclers Europe, & Eunomia. (2020). *Flexible films market in Europe: State of play* (52 p.). Plastics Recyclers Europe. <https://www.plasticsrecyclers.eu/wp-content/uploads/2022/10/flexible-films-market.pdf>.
11. Yang, M., Jiang, X., Xiang, X., Qu, P., & Zhu, M. (2025). Recent developments in recycling of post-consumer polyethylene waste. *Green Chemistry*, 27(15), 3900–3948. <https://doi.org/10.1039/D4GC06566B>.
12. Azarmi, R., & Ashjarian, A. (2015). Type and application of some common surfactants. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 7(2), 632–640. <https://www.jocpr.com/articles/type-and-application-of-some-common-surfactants.pdf>.
13. Das, R., et al. (2024). A comprehensive review on the creation, description, and recent advances in the utilization of biobased polyhydroxy surfactants. *Journal of Chemistry*, 2024, Article 6120535. <https://doi.org/10.1155/2024/6120535>.
14. RecyClass. (2025). *Recyclability evaluation protocol for PE films (REP-PEflex-01)* (Version 6.0). Plastics Recyclers Europe/RecyClass. <https://recyclclass.eu/wp-content/uploads/2025/01/REP-PEflex-001-v.6.0.pdf>.
15. Santos, A. S. F., Santana, R. M. C., Agnelli, J. A. M., & Manrich, S. (2001). Characterization of low-density polyethylene after recycling. *Polymer Recycling*, 6(2), 57–68.
16. Santana, R. M. C., & Gondim, G. (2009). Influence of cleaning conditions on the degradation of recycled HDPE. *Journal of Applied Polymer Science*, 112(3), 1454–1460. <https://doi.org/10.1002/app.29479>.

Дата першого надходження статті до видання: 24.11.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 07.12.2025

**Oleg Lozovyi¹, Viktoriia Plavan², Serhii Tytarenko³, Olena Okhmat⁴,
Yevhen Zaitsev⁵, Olena Kryukova⁶**

¹Postgraduate student of the Department of Chemical Technologies and Resource Conservation
Kyiv National University of Technologies and Design (Kyiv, Ukraine)

E-mail: o.lozovoy@biosphere-corp.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0001-2228-9058>

²Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Chemical Technologies and Resource Conservation
Kyiv National University of Technologies and Design (Kyiv, Ukraine)

E-mail: plavan.vp@knutd.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9559-8962>

ResearcherID: [I-5852-2015](https://orcid.org/0000-0001-9559-8962). **SCOPUS Author ID:** [6603130130](https://orcid.org/0000-0001-9559-8962)

³Postgraduate student of the Department of Chemical Technologies and Resource Conservation
Kyiv National University of Technologies and Design (Kyiv, Ukraine)

E-mail: tytarenko.ss@knutd.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-6307-4482>

⁴PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Leather and Fur Biotechnology
Kyiv National University of Technologies and Design (Kyiv, Ukraine)

E-mail: oxmat.oa@knutd.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0927-8706>

Scopus Author ID: [57194089217](https://orcid.org/0000-0003-0927-8706)

⁵Master's student of the Department of Chemical Technologies and Resource Conservation
Kyiv National University of Technologies and Design (Kyiv, Ukraine)

E-mail: ktpthv@knutd.edu.ua

⁶PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemical Technologies and Resource Conservation
Kyiv National University of Technologies and Design (Kyiv, Ukraine)

E-mail: kryukova.oa@knutd.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8638-3580>

SCOPUS Author ID: [24335433200](https://orcid.org/0000-0001-8638-3580)

SELECTION OF SURFACE-ACTIVE AGENTS FOR APPLICATION IN MECHANICAL RECYCLING TECHNOLOGIES OF POLYETHYLENE

Recycling of polymeric materials initiates following waste collection and comprises multiple processing stages: sorting, decontamination (washing), comminution, consolidation, and reprocessing. Within the context of mechanical plastic waste recycling, the decontamination stage represents a critical operation. The presence of contaminants can result in quality degradation of the recycled product and diminish its commercial value. Polyethylene (PE) films constitute the predominant fraction of flexible packaging materials; however, their mechanical recycling is hindered by substantial contamination levels, including food residues, adhesive remnants, printing pigments, adhesive agents, moisture, and fine particulate impurities. In industrial-scale PE film washing circuits, the detergent washing operation employing surface-active substances (surfactants) is essential. This work addresses the selection of washing formulations intended for polyethylene mechanical recycling technologies. Through comprehensive characterization of various surfactant types, Disponil® ENS 47 is recommended for decontamination of polyethylene film waste bearing organic fouling (food-derived residues). The marked alkaline character of this formulation facilitates efficient fat saponification, while its limited foaming tendency renders it compatible with industrial-scale washing installations. The minimal cloud point exhibited by Plurafac® SLF 180 permits its effective deployment in low-temperature washing operations. The superior detergency of Plurafac® LF 120 supports its recommendation for intensive treatment of heavily fouled polyethylene film waste in mechanical recycling systems, notably under elevated temperature conditions. Optimization of surfactant formulation, temperature, pH, and residence time will achieve satisfactory color permanence, appropriate melt rheological behavior, and mechanical performance of secondary PE, free from residual contaminants and odoriferous compounds. Such optimization will enable broadened application scope for secondary polymer pellets.

Keywords: surfactants, mechanical recycling, polyethylene waste, cleaning performance.

Fig.: 1. Table: 1. References: 16.