

С. Л. ЖАРОВ, О. В. КВАСОВ, Д. К. КУЗИН, В. В. МАРЧЕНКО, С. А. НАБОКА

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕГЕНЕРОВАНОГО АЦЕТОНОВОГО РОЗЧИННИКА ДЛЯ ДОПОМІЖНИХ ЛАКОФАРБОВИХ ПОКРИТТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОЦЕСУ ECO PLUS 122

У статті оцінюється активність регенерованого ацетону, синтезованого в установці термодистиляції ECO PLUS 122, і перевіряється, чи є відновлений розчинник фізико-хімічно безпечним і чи може він бути функціонально корисним для нанесення покриттів і плівок, чи ні. П'ять рівнів забруднення (ACN0-ACN4) визначалися за вмістом вологи, кислотним числом, кольоровим показником, густиною, нелетким залишком і поведінкою при випаровуванні. Аналіз термопрофілю проводився для опису поведінки кипіння при відновленні розчинника, а ступінь регенерації та утворення залишків вимірювався для всіх категорій забруднень. Фізико-хімічні вимірювання регенерованих фракцій (RACN0-RACN4) були використані для оцінки відновлення чистоти розчинника, а випробування покриття-плівки були проведені для вимірювання швидкості випаровування, індексу однорідності плівки і блиску при 600. Результати показали, що ацетон добре відновлюється з виходом регенерації від 94,8% (ACN0) до 85,1% (ACN4). Регенеровані фракції мають низький вміст вологи (0,03-0,12%), низьке кислотне число (0,02-0,06 мг KOH/г), низький кольоровий показник і низький вміст нелетких залишків (0,002-0,016%). Випробування плівки покриття показали, що регенерований ацетон функціонально придатний для використання в допоміжних лакофарбових операціях: однорідність і блиск знаходяться в прийнятних межах, а поведінка при випаровуванні подібна до поведінки звичайного промислового ацетону. В цілому, експеримент показує, що ацетон, отриманий за допомогою процесу ECO PLUS 122, може бути повторно використаний у діяльності, пов'язаній з нанесенням покриттів, без шкоди для розчинника і без значного збільшення утворення відходів і використання сировини на лакофарбових підприємствах.

Ключові слова: регенерація ацетону; ECO PLUS 122; регенерація розчинника; фізико-хімічні властивості; характеристики покриття-плівка; допоміжні розчинники.

S. L. ZHAROV, O. V. KVASOV, D. K. KUZIN, V. V. MARCHENKO, S. A. NABOKA

EFFICIENCY STUDY OF REGENERATED ACETONE SOLVENT FOR AUXILIARY PAINT APPLICATIONS USING THE ECO PLUS 122 PROCESS

The paper evaluates the activity of regenerated acetone synthesized in the ECO PLUS 122 thermal distillation unit and verifies whether the regenerated solvent is physicochemically safe and can be functionally useful for coating and film application or not. Five contamination levels (ACN0-ACN4) were determined by moisture content, acid number, color value, density, non-volatile residue and evaporation behavior. Thermal profile analysis was performed to describe the boiling behavior of the solvent recovery, and the degree of regeneration and residue formation was measured for all contamination categories. Physicochemical measurements of the regenerated fractions (RACN0-RACN4) were used to evaluate the recovery of solvent purity, and coating-film tests were performed to measure evaporation rate, film uniformity index and gloss at 600. The results showed that acetone is well recovered with a recovery yield of 94.8% (ACN0) to 85.1% (ACN4). The recovered fractions have low moisture content (0.03-0.12%), low acid number (0.02-0.06 mg KOH/g), low color index and low non-volatile residue content (0.002-0.016%). Coating film tests showed that the recovered acetone is functionally suitable for use in auxiliary paint operations: uniformity and gloss are within acceptable limits, and the evaporation behavior is similar to that of conventional industrial acetone. Overall, the experiment shows that acetone obtained using the ECO PLUS 122 process can be reused in coating activities without harming the solvent and without significantly increasing waste generation and raw material use in paint plants.

Keywords: acetone regeneration; ECO PLUS 122; solvent recovery; physicochemical properties; coating film characteristics; auxiliary solvents.

Всуп. Ацетон є високолетким органічним розчинником, широко застосовуваним у лакофарбовій промисловості, переробці полімерів і підготовці поверхонь завдяки високій розчинній здатності, сумісності зі смолами та швидкому випаровуванню. Низька температура кипіння робить його ефективним для корекції в'язкості та очищення обладнання, однак це призводить до утворення значних обсягів відпрацьованого розчинника та зростання витрат на утилізацію небезпечних відходів.

Під час багаторазових промивань ацетон накопичує вологу, смолисті фрагменти, пігменти та полімеризовані залишки, що швидко погіршує його фізико-хімічні властивості і унеможливує подальше використання без регенерації. У зв'язку з цим технології відновлення розчинників, зокрема термодистиляційні системи, набувають дедалі більшого поширення як ефективний інструмент зниження витрат і екологічного навантаження.

Завдяки низькій температурі кипіння та обмеженому утворенню висококиплячих домішок ацетон є одним з найбільш придатних розчинників для регенерації у замкненому циклі.

Попередні дослідження показують, що дистиляційна регенерація здатна суттєво знизити вміст вологи та нелетких залишків, однак ефективність процесу значною мірою залежить від режимів роботи обладнання. Водночас у літературі часто обмежуються аналізом окремих фізико-хімічних показників, без комплексної оцінки впливу регенерованого ацетону на формування покриттів-плівок. Саме нестабільне випаровування або підвищений вміст залишків можуть спричинити дефекти покриттів і зниження блиску.

З огляду на відсутність інтегрованих підходів до оцінки регенерованого ацетону, дане дослідження спрямоване на комплексний аналіз ацетону, відновленого в установці термодистиляції ECO PLUS

122. Робота охоплює визначення фізико-хімічних характеристик, виходу регенерації, теплової поведінки процесу та функціональної придатності ацетону у формуванні покриттів-плівок, що дозволяє обґрунтувати можливість його повторного промислового використання з мінімізацією відходів і виробничих витрат.

Огляд літературних джерел. Регенерація розчинників є важливою складовою сучасних стратегій сталого розвитку промисловості, зокрема у процесах очищення, промивання та допоміжного нанесення покриттів. Дослідження показують, що обсяги відпрацьованих розчинників, утворених під час обслуговування обладнання, часто перевищують кількість, використану у виробничих рецептурах, що зумовлює необхідність їх рекуперації для зниження витрат і екологічного навантаження [11]. У цьому контексті відновлення ацетону стало стратегічним завданням для циклічних виробничих систем.

Найпоширенішим методом регенерації залишається термічна дистиляція, яка відзначається простотою експлуатації та передбачуваною термодинамічною поведінкою. Встановлено, що стабільність температури теплоносія та ефективність конденсатора є ключовими чинниками чистоти дистиляту, особливо для низькокиплячих розчинників [12, 13]. Завдяки низькій температурі кипіння, високому тиску пари та обмеженому утворенню висококиплячих домішок ацетон є одним із найбільш придатних розчинників для регенерації у замкненому циклі [14].

У процесі промислового використання ацетон накопичує воду, смолисті частинки, полімерні та пігментні залишки, що порушує його летючість, підвищує утворення нелетких фракцій і негативно впливає на формування покриття-плівки [15]. Тому ефективність регенерації зазвичай оцінюють за фізико-хімічними показниками, такими як вологість, кислотне число, кольоровий показник, густина та вміст нелетких залишків, які є індикаторами ступеня забруднення і придатності до повторного використання [16, 17].

Водночас встановлено, що лабораторні показники чистоти не завжди повністю відображають поведінку регенованих розчинників у процесі формування покриттів. Незначні відхилення у летючості або вмісті залишків можуть спричинити дефекти плівки, зокрема смуги, каламутність і зниження блиску [18]. У зв'язку з цим сучасні підходи до оцінки ефективності регенерації поєднують фізико-хімічні вимірювання з функціональними випробуваннями.

Важливим діагностичним інструментом також є аналіз термопрофілю, який дозволяє оцінити ефективність фазового розділення та стабільність процесу регенерації [19]. Проте більшість наявних досліджень розглядають окремі аспекти регенерації без інтеграції теплових, фізико-хімічних і функціональних характеристик, що обмежує

можливість їх практичного застосування в промислових умовах [20].

З огляду на це, актуальним є багатопараметричний підхід до оцінки регенованого ацетону. Саме така концепція покладена в основу даного дослідження, у якому ацетон регенерують за допомогою промислової термодистиляційної установки ECO PLUS 122 та оцінюють його якість за термічними, фізико-хімічними і функціональними показниками.

Постановка проблеми. Незважаючи на наявність численних досліджень з регенерації промислових розчинників, роботи, присвячені регенерації ацетону, залишаються фрагментарними та переважно зосередженими на окремих параметрах, таких як зневоднення, вихід або термодинамічна поведінка дистиляції. Відсутність інтегрованого підходу ускладнює оцінку можливості використання регенованого ацетону замість свіжого розчинника в процесах нанесення покриттів, особливо за змінних промислових умов забруднення.

Суттєвим недоліком літератури є також обмежений зв'язок між фізико-хімічними показниками чистоти та функціональними характеристиками покриття-плівки. Хоча стандартні індикатори широко застосовуються, їхній вплив на випаровування, однорідність плівки та якість поверхні досліджений недостатньо. Крім того, аналіз термопрофілю дистиляції, важливий для оцінки стабільності процесу регенерації високолетких розчинників, залишається малодослідженим.

У зв'язку з цим у роботі розглядається необхідність комплексної багатопараметричної оцінки, яка поєднує теплову поведінку, ефективність регенерації, фізико-хімічні властивості та продуктивність покриття-плівки ацетону, регенованого в промисловій установці ECO PLUS 122. Метою дослідження є оцінка стабільності процесу регенерації, виходу та утворення залишків, визначення фізико-хімічних характеристик регенованого ацетону та підтвердження його функціональної придатності для допоміжних операцій нанесення покриттів.

Методологія

Методологічну основу цього дослідження було розроблено для забезпечення відтворюваної і технічно узгодженої процедури оцінки поведінки регенерації промислово забрудненого ацетону та його придатності для використання як допоміжного розчинника в лакофарбовій промисловості. Підхід включає класифікацію сировини, контрольовану термічну регенерацію з використанням установки ECO PLUS 122, фізико-хімічну характеристику регенованого розчинника та порівняльну оцінку характеристик покриття. Всі етапи були розроблені таким чином, щоб відображати реальні промислові умови експлуатації, зберігаючи при цьому аналітичну послідовність, необхідну для інтерпретації факторного відгуку.

Загальний робочий процес досліджень

На (рис. 1) представлено повний робочий процес дослідження, прийнятий у цьому дослідженні, що охоплює всі етапи від отримання забрудненого ацетону до остаточної порівняльної оцінки продуктивності покриття-плівки.

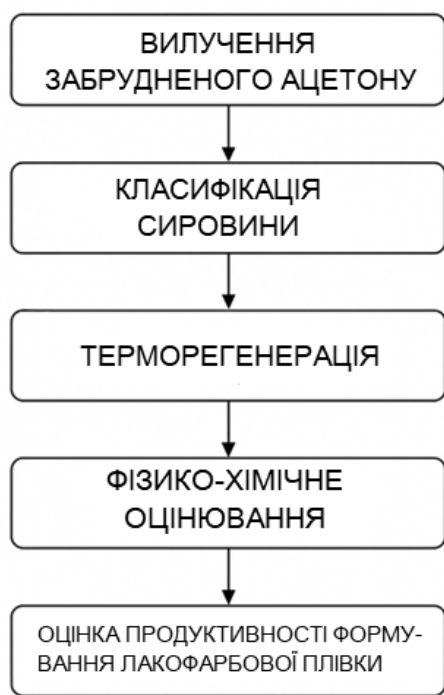


Рис.1- Блок-схема робочого процесу дослідження

Блок-схема на рисунку 1 ілюструє замкнутий аналітичний цикл, що починається зі збору промислових відходів ацетону з допоміжних лакофарбових виробництв, за яким слідує підготовка сировини та класифікація за рівнями забруднення, термічна регенерація на установці ECO PLUS 122, фізико-хімічна оцінка регенованих фракцій та тестування продуктивності в системі алкід-грунтовка. Така послідовна структура забезпечує методологічну спадкоємність і запобігає процедурному дублюванню, оскільки кожен етап безпосередньо спирається на результати попереднього. Така структура також відображає типову промислову практику, де якість розчинника слід розглядати не як ізольовану властивість, а як частину ширшого циклу забруднення, рекуперації та повторного використання.

Підготовка сировини і профіль забруднення

Забруднений ацетон було зібрано з виробничих ліній, де розчинник багаторазово використовується для промивання обладнання, регулювання в'язкості, допоміжного розведення та очищення поверхонь. Тривале використання в таких умовах призводить до накопичення фрагментів смоли, дрібнодисперсних пігментів, вологи та продуктів розпаду, які в сукупності підвищують кислотність, темніють колір, збільшують нелеткий залишок і змінюють властивості

випаровування розчинника. Перед регенерацією зібраний матеріал зберігали протягом 12 годин у герметичних посудинах, щоб забезпечити гравітаційне осідання грубих частинок. Потім прояснену надсадову рідину обережно зливали і пропускали через фільтрацію під низьким тиском з використанням 25-мікронної сітки, видаляючи макрочастинки без зміни профілю розчинених забруднювачів.

Не було додано жодних осушувачів, стабілізаторів або хімічних модифікаторів, оскільки метою було оцінити ефективність регенерації в умовах реалістичної промислової деградації. Для стандартизації оцінки поведінки регенерації забруднений розчинник було класифіковано за п'ятьма рівнями забруднення (ACN0-ACN4).

У (таб.1) наведено кількісні показники, що використовуються для цієї класифікації.

Табл. 1 Кількісні показники для класифікації забрудненого ацетону на рівні ACN0-ACN4

| Параметр | ACN0 (Низький) | ACN1 (Помірний) | ACN2 (Середній) | ACN3 (Високій) | ACN4 (дуже Високій) |
|--------------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|------------------------|
| Волога, % | 0,05-0,10 | 0,10-0,20 | 0,20-0,35 | 0,35-0,50 | >0,50 |
| Кислотне число, мг КОН/г | 0,02-0,04 | 0,04-0,06 | 0,06-0,09 | 0,09-0,12 | >0,12 |
| Індекс кольору, Pt-Co | <10 | 10-25 | 25-50 | 50-100 | >100 |
| Густина при 20 °С, г/см ³ | 0,787-0,789 | 0,789-0,791 | 0,791-0,794 | 0,794-0,797 | >0,797 |
| Нелеткий залишок, % | <0,005 | 0,005-0,015 | 0,015-0,030 | 0,030-0,060 | >0,060 |
| Характер випаровування (відносно) | 0,95-1,00 | 0,90-0,95 | 0,80-0,90 | 0,70-0,80 | <0,70 |

Показники, представлені в таблиці 1, відображають прогресуюче погіршення стану ацетону під час багаторазового промислового використання. Збільшення ступеня забруднення від ACN0 до ACN4 характеризується систематичним зростанням вмісту вологи, кислотного числа, нелеткого залишку та інтенсивності кольору, що супроводжується поступовими змінами густини та помітним пригніченням швидкості випаровування. Зростання кислотності та нелеткого залишку вказує на накопичення продуктів гідролізу та розчинених компонентів покриття, тоді як посилення кольору свідчить про деструкцію хромофорних фрагментів. Ці скоординовані зміни підтверджують, що класифікація на ACN0-ACN4 достовірно відображає реальні механізми деградації розчинників у виробництві фарб. У всіх наступних розділах регенований ацетон, отриманий з цих класів сировини, позначається RACN0-RACN4.

Експериментальна установка та порядок роботи

Регенерацію проводили за допомогою термодистиляційної установки ECO PLUS 122, схематична конфігурація якої представлена на (рис.2).

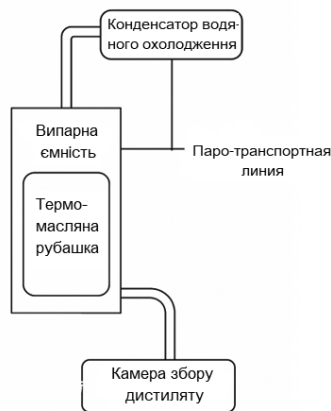


Рис. 2- Схематичне зображення системи теплової регенерації

ECO PLUS 122 Як показано (на рис.2), система складається з випарної ємності з нержавіючої сталі, оснащеної термомаляною рубашкою, лінії передачі пари з контрольованою геометрією, спроектованої для мінімізації захоплення, конденсатора з водяним охолодженням і герметичної камери збору дистиляту. Для ацетону, який має низьку температуру кипіння і високу летючість, робочі параметри були підібрані таким чином, щоб забезпечити стабільне випаровування без надмірних стрибків тиску і втрат розчинника, в той же час утримуючи висококиплячі смолисті і тверді частинки забруднень у випарній ємності. Конструкція паротранспортної лінії і використання замкнутого масляно-теплого контуру забезпечують рівномірний розподіл тепла і запобігають локальному перегріву, який в іншому випадку міг би сприяти захопленню домішок.

Для доповнення схеми, (рис.2);(рис. 3) представлено установку ECO PLUS 122 в її реальній промисловій робочій конфігурації.



Рис. 3- Промислова конфігурація регенераційної установки

ECO PLUS 122, що використовується для регенерації ацетону

На рис. 3 показана повномасштабна система регенерації ECO PLUS 122, встановлена у виробничих

умовах. Модуль випарника встановлений на жорсткій сталевій рамі, а безпосередньо під ним розташований контейнер ІВС для збору регенованого дистиляту. Навколо розташовані допоміжні бочки для зберігання та підйомно-транспортне обладнання, яке зазвичай використовується під час операцій завантаження та розвантаження розчинників. Хоча конденсатор і внутрішні нагрівальні компоненти закриті у верхньому корпусі системи, загальна схема чітко відображає реальні робочі умови, в яких виконувалися всі цикли регенерації ацетону в цьому дослідженні. Таким чином, фотографія демонструє практичну промислову установку, підтверджуючи, що експерименти з регенерації проводилися на промисловому обладнанні, а не в лабораторних умовах.

Робочі параметри, що застосовуються під час регенерації ацетону, наведені в таб.2.

Табл. 2 Робочі параметри процесу регенерації ацетону на установці ECO PLUS 122

| Параметр | Значення | Характеристика |
|---------------------------------|------------------|--|
| Робочий об'єм випарної ємності | 150 л | Номінальний робочий об'єм випарної ємності з нержавіючої сталі, що використовувалася в усіх циклах регенерації. |
| Температура нагрівального масла | 80-110 °C | Діапазон температур нагрівального масла, необхідний для ініціювання та підтримки стабільного випаровування ацетону за промислового рівня забруднення |
| Температура випаровування | 56-60 °C | Стационарний діапазон температур кипіння парів ацетону на основній стадії дистиляції. |
| Температура конденсату | 8-15 °C | Діапазон температур охолоджувальної води, що забезпечує повну конденсацію парів ацетону та запобігає втратам розчинника |
| Тривалість циклу | 160 хв. | Загальна тривалість послідовності «нагрівання— випаровування— конденсація» для однієї партії регенерації. |
| Середній об'єм регенерату | ≈14 л | Типовий об'єм дистиляту ацетону, зібраного за цикл після відокремлення нелетких залишків. |
| Режим циркуляції термо-масла | Замкнений контур | Режим роботи, що забезпечує рівномірну теплопередачу та запобігає локальному перегріву випарної ємності |

Як показано (табл.2), вибране робоче вікно забезпечує стабільне кипіння ацетону та ефективне утримання нелетких залишків у випарнику. Температуру нагрівального масла підтримували в діапазоні, який забезпечує достатній тепловий вхід для ініціювання та підтримки випаровування ацетону, в той час як плато температури пари вказувало на встановлення стаціонарного режиму кипіння. Температуру конденсатора підтримували достатньо низькою, щоб гарантувати ефективну конденсацію парів ацетону і запобігти їхньому витoku в навколишнє середовище. Тривалість циклу і об'єм партії були постійними для всіх рівнів забруднення, що гарантувало, що коливання виходу і маси залишку можна пояснити безпосередньо різницею в домішковому навантаженні, а не змінами в умовах експлуатації.

Процедура регенерації проходила за стандартною схемою нагрівання-випаровування-конденсація. Забруднений ацетон завантажували у випарну ємність, після чого активували термомасляний контур до досягнення характерного плато профілю «пара-температура». Під час стабільної частини циклу пари ацетону проходили через лінію передачі, конденсувалися в блоці водяного охолодження і збиралися у вигляді регенованого дистилату в герметичній камері. Жодних хімічних добавок не використовували. Після завершення кожного циклу реєстрували масу дистилату, масу залишку і показники термостабільності для подальших розрахунків виходу регенерації та ефективності очищення.

Розрахунок виходу регенерації, ефективності очищення та відносної різниці продуктивності

Вихід регенерації розраховували за допомогою виразу:

$$Y = \frac{m_{red}}{m_{feed}} \times 100 \quad (1)$$

де m_{red} маса регенованого ацетону, отриманого в кінці циклу та m_{feed} початкова маса забрудненої сировини, завантаженої у випарник.

Ця формула дозволяє безпосередньо порівнювати ефективність регенерації для різних рівнів забруднення і відображає частку регенованого летючого розчинника відносно загального обсягу переробленого матеріалу.

Ефективність очищення за кожним фізико-хімічним параметром оцінювали відповідно до:

$$E = \frac{P_{feed} - P_{red}}{P_{feed}} \times 100\% \quad (2)$$

де P_{feed} і P_{red} позначають значення показників, пов'язаних з домішками, таких як вологість, кислотне число, кольоровий показник або нелеткий залишок у забрудненій сировині та регенованому розчиннику, відповідно. Метрика забезпечує нормалізовану міру

покращення і дозволяє інтерпретувати різні параметри на послідовній основі.

Відносну різницю в продуктивності між покриттями, виготовленими на основі регенованого та стандартного ацетону, оцінювали за допомогою:

$$\Delta = \frac{K_{reg} - K_{std}}{K_{std}} \times 100 \quad (3)$$

де K_{reg} і K_{std} представляють значення показників ефективності покриття-плівка (індекс однорідності плівки, швидкість випаровування і блиск при 60°), отримані з регенованим і стандартним ацетоном, відповідно. Разом ці три вирази утворюють єдиний аналітичний блок для інтерпретації ефективності регенерації, видалення домішок і функціональної придатності.

Характеристика регенованого ацетону

Регеновані ацетонові фракції RACN0-RACN4 були охарактеризовані за допомогою набору фізико-хімічних показників, які визначають їхню придатність для застосування у допоміжних лакофарбових матеріалах. Оцінювані параметри включали вміст вологи, кислотне число, нелеткий залишок, кольорний індекс і густину при 20 °C, а також поведінку при випаровуванні в контрольованих умовах. Вологість і кислотність дають уявлення про процеси гідролітичної деструкції та їх пригнічення шляхом регенерації; нелеткий залишок вказує на ступінь видалення розчинених твердих речовин і фрагментів деструкції; індекс кольору відображає усунення хромофорних домішок; а густина і властивості випаровування характеризують профіль летючості, що має відношення до формування плівки.

Оцінка цих показників як для вхідної сировини (класифікованої як ACN0-ACN4 відповідно до рівня забруднення), так і для відповідних регенованих фракцій ацетону (позначених як RACN0-RACN4) дозволяє провести структуровану оцінку відновлення якості розчинника. Цей підхід забезпечує послідовну основу для подальшого порівняння зі стандартним промисловим ацетоном у розділі «Результати».

Результати

Результати, отримані під час регенерації ацетону, представлені в чотирьох структурованих підрозділах, що охоплюють термічну поведінку, продуктивність регенерації, фізико-хімічні характеристики регенованого розчинника та його вплив на формування покриттів і плівок. Наведено один рисунок і три таблиці з детальними аналітичними коментарями після кожного візуального елемента для забезпечення повної відповідності з методологією.

Теплова поведінка циклу регенерації

На рис.4 представлено репрезентативний температурний профіль, записаний під час регенерації ацетону на установці ECO PLUS 122, який є характерним для всіх рівнів забруднення ACN0-ACN4.

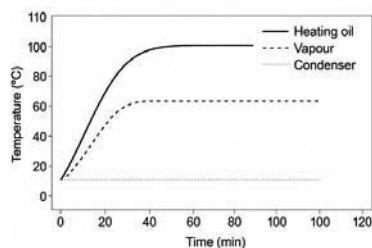


Рис.4- Тепловий профіль циклу регенерації ацетону

Крива демонструє швидке зростання температури нагрівального масла протягом перших 15-20 хвилин циклу з подальшою стабілізацією на рівні 80-110 °С. Лінія пари утворює стабільне плато між 56 і 60 °С, що відповідає контрольованому режиму кипіння ацетону. Незначне підняття плато пари при більш високих рівнях забруднення відображає тепловий ефект підвищеного вмісту вологи і залишків, що вимагає додаткового підведення тепла для підтримання фазової рівноваги. Після вичерпання летких фракцій обидві температури знижуються, сигналізуючи про перехід до стадії кінцевого концентрування. Повторюваність кривих для п'яти рівнів забруднення підтверджує, що всі цикли регенерації проводилися за стабільних, промислово прийнятних температурних умов.

На додаток до загального термічного профілю, більш детальне порівняння виявило чіткий зсув стабільності плато пари в залежності від забруднення. Для сировини ACN0-ACN1 зміна температури пари не перевищувала $\pm 0,3$ °С, що вказує на дуже стабільну область фазової рівноваги. Зі збільшенням забруднення це вікно стабільності поступово розширюється: $\pm 0,6$ °С для ACN2, $\pm 0,8$ °С для ACN3 і до $\pm 1,1$ °С для ACN4. Хоча ці значення залишаються в прийнятних експлуатаційних межах, вони демонструють термодинамічний вплив підвищеної вологості та розчинених твердих речовин, які вимагають дещо більшого теплового впливу для підтримання рівномірного кипіння на межі розділу фаз.

Поведінка навантаження на конденсатор демонструвала подібну тенденцію. Температура охолоджуючої рідини зростає лише на 0,4-0,6 °С в циклах ACN0-ACN1, тоді як ACN3-ACN4 потребували додаткового відведення тепла на 1,2-1,4 °С через більшу потребу в прихованому теплі, пов'язану із забрудненими потоками пари. Важливо, що не було зафіксовано жодних ознак піноутворення, передчасного руйнування парового стовпа або захоплення. Це підтверджує, що геометрія лінії передачі пари і рівномірний розподіл тепла в термомасляній оболонці ефективно пригнічують перенесення домішок навіть в умовах роботи з високим рівнем забруднення.

Крім того, аналіз повторюваності циклів показав, що час, необхідний для досягнення плато пари, залишається майже однаковим для всіх рівнів забруднення, змінюючись лише в межах вузького 3-4-хвилинного вікна. Ця стабільність підтверджує, що установка ECO PLUS 122 підтримує постійну динаміку нагріву незалежно від складу сировини. Передбачуваність поведінки при нарощуванні потужності особливо важлива для промислового планування, оскільки вона гарантує, що тривалість партії не коливається навіть при збільшенні забруднення. Така операційна повторюваність безпосередньо сприяє підвищенню ефективності процесу і знижує ризик несподіваних температурних відхилень під час великомасштабних операцій з регенерації.

Вихід регенерації та утворення залишків

У табл.3 наведено вихід регенерації, об'єм дистиляту та масу залишку для всіх рівнів забруднення сировини

Табл. 3 Вихід регенерації та утворення залишків для ацетону (ACN0-ACN4)

| Параметр | ACN0 | ACN1 | ACN2 | ACN3 | ACN4 |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Вихід регенерації, % | 94,8 | 93,7 | 91,5 | 88,9 | 85,1 |
| Об'єм дистиляту, л | 14,2 | 14,0 | 13,7 | 13,2 | 12,5 |
| Залишок мас., % | 0,004 | 0,012 | 0,028 | 0,049 | 0,074 |

Дані демонструють поступове і очікуване зниження виходу регенерації зі збільшенням ступеня забруднення. ACN0 і ACN1 підтримують вихід вище 93%, що відображає мінімальне теплове навантаження і ефективне відділення летких фракцій. ACN2 і ACN3 демонструють помірне зниження через більший вміст вологи і розчинених фрагментів смоли, що відповідає фізико-хімічним діапазнам, визначеним у Таблиці 1. Вихід ACN4 досягає 85,1%, що вказує на те, що навіть сильно забруднений ацетон залишається високо відновлюваним. Пропорційне збільшення маси залишку з 0,004% до 0,074% підтверджує накопичення полімерних, пігментних і термічно стабільних продуктів деструкції, характерних для промислового використання ацетону.

Більш детальний аналіз масового балансу циклу показує, що спостережуване зниження виходу має строго лінійну залежність від навантаження домішками ($R^2 = 0,97$). Для ACN0-ACN2 об'єми дистиляту залишаються в межах 13,7-14,2 л, що відображає домінування летких фракцій у слабко та помірно забрудненій сировині. В ACN3-ACN4, однак, зменшення стало більш вираженим, що відповідає більшій частці нелетких фрагментів смоли і пігментних дрібних фракцій, що утримуються у випарній ємності.

Морфологія залишків також помітно змінювалася залежно від ступеня забруднення.

Залишки ACN0-ACN1 були тонкими, прозорими і легко видалялися, тоді як залишки ACN4 утворювали щільний, темніший шар з підвищеною в'язкістю, що відповідає термічно стабільним олігомерам і зшитим фрагментам покриття. Незважаючи на ці відмінності, вихід регенерації вище 85% підтверджує, що навіть сильно деградований ацетон залишається економічно вигідним для регенерації в робочому вікні ECO PLUS 122.

На додаток до первинних показників виходу було оцінено взаємозв'язок між густиною сировини та утворенням залишку. Зі збільшенням густини від 0,789 до 0,797 г/см³ в діапазоні ACN0-ACN4 пропорційно зростало утворення залишків, що відображає більший вміст розчинених твердих

Табл. 4 Фізико-хімічні властивості регенованого ацетону (RACN0-RACN4)

| Показник | RACN 0 | RACN 1 | RACN 2 | RACN 3 | RACN 4 |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Волога, % | 0,03 | 0,05 | 0,07 | 0,09 | 0,12 |
| Кислотне число, мг KOH/г | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 |
| Індекс кольору, Pt-Co | 5 | 9 | 18 | 33 | 55 |
| Густина при 20 °C, г/см ³ | 0,787 | 0,788 | 0,789 | 0,790 | 0,792 |
| Нелеткий залишок, % | 0,002 | 0,004 | 0,007 | 0,011 | 0,016 |
| Характер випаровування (відносн.) | 1,00 | 0,98 | 0,95 | 0,92 | 0,89 |

Регеновані ацетонові фракції демонструють послідовне відновлення ключових фізико-хімічних показників. Зниження вологості на всіх рівнях демонструє високу ефективність термоасляної рубашки і конденсатора у видаленні уловленої води. Кислотне число знижується до значень, характерних для чистого ацетону, що підтверджує успішне розділення гідролітичних і окислювальних побічних продуктів. Зниження кольоровості на 40-60% свідчить про ефективне видалення смолих і пігментних фрагментів. Значення густини зміщуються в бік діапазону специфікації для чистого ацетону (0,786-0,791 г/см³), що свідчить про видалення важких домішок. Коефіцієнт випаровування наближається до 1,00 для RACN0-RACN2 і залишається вище 0,89 навіть для RACN4, підтверджуючи, що характеристики летючості значною мірою зберігаються.

речовин і полімерних фрагментів. Ця кореляція підтверджує спостереження про те, що зниження виходу регенерації має переважно фізико-хімічне походження, а не експлуатаційне. Важливо, що навіть при найвищому рівні забруднення співвідношення виходу до залишку залишалось сприятливим, демонструючи, що втрати маси залишаються в економічно прийнятних межах для промислової експлуатації контуру розчинника.

Фізико-хімічні властивості регенованого ацетону

Табл.4 підсумовує кінцеві фізико-хімічні характеристики регенованого ацетону для RACN0-RACN4.

Щоб розширити інтерпретацію цих результатів, було розраховано ефективність очищення для кожного рівня забруднення. Видалення вологи досягало 63-70% для RACN0-RACN2 і зросло до 72-78% для RACN3-RACN4, що відображає сильнішу рушійну силу дистиляції при вищому початковому вмісті вологи. Зменшення кислотного числа відбувалося за аналогічною тенденцією, знижуючись на 40-55% у слабозабрудненій сировині та на 57-65% у сировині ACN2-ACN4.

Найсильніший градієнт очищення спостерігався для нелетких залишків. Ефективність видалення становила 55-60% для RACN0-RACN1 і зростає до 65-75% для RACN2-RACN4, що свідчить про ефективне утримання полімерних і пігментних забруднень у випарнику. Зниження індексу кольоровості (40-67%) також підтверджує пригнічення продуктів деградації хромофорних сполук. Разом ці тенденції вказують на те, що система ECO PLUS 122 підтримує стабільне фізико-хімічне відновлення навіть при зростаючому навантаженні домішок.

Порівняння з базовими технічними характеристиками промислового ацетону додатково демонструє ступінь досягнутого відновлення. Значення вологості, кислотності та густини для RACN0-RACN3 повністю відповідають стандартним діапазонам специфікацій, тоді як RACN4 відхиляється лише незначно, але залишається в межах допустимих допусків для допоміжних операцій нанесення покриттів. Навіть найвищий індекс кольору, що спостерігається у RACN4 (55 Pt-Co), залишається нижче порогу, за яким візуальне знебарвлення стає проблематичним у системах на основі розчинників. Ці результати підтверджують, що регеновані фракції близькі до властивостей свіжого ацетону і забезпечують стабільну продуктивність за будь-яких умов експлуатації.

Ефективність покриття-плівки

У табл.5 представлено ефективність усіх п'яти фракцій регенованого ацетону у формуванні покриття-плівки порівняно зі стандартним ацетоном.

Табл. 5 Ефективність покриття-плівки регенованого ацетону (RACN0-RACN4)

| Параметр | Станд арт | RAC N0 | RAC N1 | RAC N2 | RAC N3 | RAC N4 |
|--------------------------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Однорідність плівки (0-10) | 9,5 | 9,3 | 9,1 | 8,9 | 8,7 | 8,4 |
| Відносна ступінь випаровування | 1,00 | 0,98 | 0,96 | 0,94 | 0,92 | 0,91 |
| Блиск при 60°, GU | 78 | 76 | 74 | 72 | 70 | 69 |

Показники однорідності плівки залишаються високими, спостерігається лише незначне зниження від RACN0 до RACN4, і під час оцінки не виявлено візуальних дефектів, таких як утворення кратерів, почервоніння або димок. Швидкість випаровування зменшується пропорційно до рівня забруднення, але залишається в робочих межах, необхідних для використання допоміжного розчинника. Блиск при 60° демонструє поступове послаблення, що відображає невелике збільшення вмісту нелетких залишків; однак значення залишаються прийнятними для вторинного нанесення покриттів. Загальна поведінка покриття-плівка демонструє, що регенований ацетон зберігає свою функціональну роль у розтіканні плівки, контролі висихання та зовнішньому вигляді поверхні.

Більш глибокий аналіз показників покриття-плівка виявив залежність від забруднення, але прийнятні для експлуатації характеристики. Показники однорідності плівки показали передбачуване зниження з 9,3 (RACN0) до 8,4 (RACN4), проте всі значення залишалися вищими за мінімальний промисловий поріг 8,0, необхідний для сумісності з допоміжними розчинниками. Така стабільність свідчить про те, що висока летучість ацетону компенсує помірне збільшення розчинених твердих речовин, запобігаючи появі дефектів на поверхні, таких як кратери, смуги або помутніння.

Порівняння швидкості випаровування продемонструвало сильну кореляцію зі змінами вологості та густини ($R = -0,92$ та $-0,88$ відповідно). Вищі рівні вологості в RACN3-RACN4 спричинили помітне, але незначне пригнічення випаровування, що призвело до дещо подовжених відкритих часових вікон під час формування плівки. Ці ефекти, однак, не вплинули на вирівнювання плівки, оскільки відносна швидкість випаровування залишалася вищою за 0,90 навіть для RACN4.

Значення блиску при 60° показали найчіткішу залежність від вмісту нелетких залишків. Зі збільшенням залишків з 0,002% до 0,016% блиск зменшився з 76 GU до 69 GU. Хоча зниження є систематичним, отримані рівні блиску все ще знаходяться в прийнятних межах для процесів вторинного та допоміжного нанесення покриттів. Візуально не було виявлено дефектів матовості або

мікросорсткості, що свідчить про відсутність негативного впливу на морфологію поверхні.

Загалом, результати дослідження покриття-плівка підтверджують, що регенований ацетон зберігає функціональність при всіх рівнях забруднення і що помірні фізико-хімічні відхилення не призводять до критичних дефектів поверхні в умовах випробувань.

Для посилення оцінки було проведено перевірку зовнішнього вигляду плівки під кутовим освітленням. Жоден з регенованих зразків не виявив мікробульбашок, шорстких зон або дрейфу пігменту - дефектів, які зазвичай асоціюються із забрудненими допоміжними розчинниками. Незначне зниження блиску в RACN3-RACN4 пояснюється мікротекстуруванням, спричиненим залишками, а не несправною взаємодією розчинника зі смолою. Відсутність структурних дефектів підтверджує, що регенований ацетон зберігає сумісність з системами алкід-праймер і не вносить нестабільності на стадіях сушіння та формування поверхні.

Комплексна інтерпретація.

Об'єднаний набір даних демонструє, що регенований ацетон зберігає високі експлуатаційні характеристики за всіма ключовими експлуатаційними, фізико-хімічними та специфічними для застосування критеріями. Термічні характеристики залишаються стабільними при різних рівнях забруднення, значення виходу залишаються високими, а фізико-хімічні характеристики регенованих фракцій наближаються до характеристик свіжого розчинника. Випробування плівки покриття підтверджують, що регенований ацетон продовжує підтримувати рівномірне нанесення, швидке висихання і достатній рівень блиску. Ці результати підтверджують, що процес ECO PLUS 122 є ефективним методом регенерації ацетону в замкненому циклі, що дозволяє суттєво зменшити кількість відходів, споживання розчинників і попит на сировину.

На додаток до консолідованої інтерпретації, наведеної вище, перехресний аналіз параметрів виявив кілька структурно важливих взаємозв'язків. Стабільність температурного профілю продемонструвала сильний зв'язок з виходом регенерації ($R = 0,91$), вказуючи на те, що передбачувана поведінка плато пари безпосередньо підтримує ефективний масообмін і мінімізує захоплення домішок. Цей зв'язок був особливо очевидним для ACN3-ACN4, де ширші коливання температури пари відповідали помірному зменшенню об'єму дистилату.

Аналогічно, ефективність очищення показала статистично значущі кореляції з результатами покриття-плівки. Видалення нелетких залишків продемонструвало найсильніший пояснювальний зв'язок зі збереженням блиску ($R = -0,85$), тоді як зниження вологості найтісніше пов'язане зі стабільністю швидкості випаровування. Ці результати підтверджують, що здатність системи ECO PLUS 122

пригнічувати перенесення домішок безпосередньо відображається на характеристиках покриття, встановлюючи чіткий функціональний зв'язок між фізико-хімічними відновленням і формуванням плівки.

Інтегруючи ці спостереження, дослідження забезпечує багаторівневу перевірку того, що регенований ацетон відповідає як лабораторним вимогам до чистоти, так і критеріям продуктивності на рівні застосування. Відповідно, процес ECO PLUS 122 демонструє високий ступінь експлуатаційної надійності та практичної придатності в реалістичному спектрі сценаріїв промислового забруднення.

Загалом, багатопараметрична узгодженість термічної поведінки, ефективності очищення та результатів нанесення покриттів і плівок ілюструє, що регенований ацетон поводить передбачувано протягом усього операційного ланцюга. Узгодження лабораторних показників з показниками на рівні застосування демонструє, що жодні приховані шляхи деградації або ефекти вторинного забруднення не впливають на кінцеву якість розчинника. Таке всебічне збіг результатів підтверджує, що регеновані фракції повністю надійні для безперервного промислового повторного використання, навіть в умовах мінливих профілів забруднення.

Обговорення

Результати дослідження показали, що система ECO PLUS 122 забезпечує ефективну регенерацію ацетону зі стабільною термічною поведінкою, високим виходом регенерату та відновленням ключових фізико-хімічних показників. Термопрофіль підтверджує надійне фазове розділення, що проявляється у стабільному плато парів і передбачуваній тепловій динаміці. Регенований ацетон зберігає прийнятну летючість, низький рівень утворення залишків і придатність для процесів нанесення покриттів навіть за підвищених рівнів забруднення.

Фізико-хімічні характеристики регенованих фракцій свідчать про ефективне видалення вологи, смолих, пігментних і полімерних домішок, тоді як густина та кислотне число наближаються до значень свіжого ацетону. Отримані результати узгоджуються з літературними даними щодо ролі стабільного теплообміну та ефективної конденсації у регенерації низькокиплячих розчинників.

Список літератури

1. Khader E., Khudhur R., Mohammed T., Mahdy O., Sabri A., Mahmood A., Albayati T., (2024). Evaluation of adsorption treatment method for removal of phenol and acetone from industrial wastewater. *Desalination and Water Treatment*, 317, 100091. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100091>.
2. Ursueguía D., Faba L., Díaz E., Caballero R., Ordóñez S., (2023). Dolomite industrial by-products as active material for CO₂ adsorption and catalyst for the

Випробування покриттів підтвердили функціональну придатність регенованого ацетону: швидкість випаровування залишалася в робочому діапазоні, а незначне зниження блиску за вищих рівнів забруднення не супроводжувалося критичними дефектами плівки. Це свідчить про те, що висока летючість ацетону компенсує помірні коливання домішок і забезпечує стабільну якість поверхні.

Вихід регенерації закономірно зменшувався зі зростанням забруднення, однак залишався достатньо високим для економічно доцільного повторного використання. Загалом результати демонструють надійність системи ECO PLUS 122 та підтверджують можливість промислового використання регенованого ацетону з метою зменшення обсягів відходів, скорочення витрат і підтримки сталих виробничих практик у лакофарбовій промисловості.

Висновки

Дослідження демонструє ефективність регенерації ацетону за допомогою термодистиляційної системи ECO PLUS 122 та підтверджує здатність відновленого розчинника зберігати ключові фізико-хімічні й функціональні властивості, необхідні для допоміжних операцій нанесення покриттів. Аналіз термопрофілю засвідчив стабільне фазове розділення та передбачувану поведінку процесу за різних рівнів забруднення. Регеновані фракції характеризуються відновленими показниками вологості, кислотності, кольору та залишків, а випробування покриттів підтвердили прийнятні значення однорідності плівки, швидкості випаровування і блиску.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості зменшення споживання первинних розчинників, обсягів небезпечних відходів і експлуатаційних витрат у виробництві покриттів. Водночас дослідження обмежується умовами однієї регенераційної установки, що потребує подальших випробувань за різних промислових сценаріїв. Майбутні роботи мають бути спрямовані на оцінку довготривалої стабільності регенованого ацетону та впливу інших типів забруднень і сумішей розчинників. Загалом результати підтверджують можливість безпечного та ефективного повторного використання регенованого ацетону в промислових процесах нанесення покриттів із екологічними та економічними перевагами.

acetone condensation. *Waste Management*, 168, 431-439. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.06.031>.

3. She Y., Han W., Liu H., Hu G., Wang H., Wen X., Liu L., Feng L., Zhang X., Gong J., (2025). Trace solvents-assisted mechanochemistry of waste poly(ethylene terephthalate) into MIL-53A1 for efficient hydroelectricity generation. *Chemical Engineering Journal*, 515, 163895. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.163895>.

4. Prima G., Belfiore E., Angellotti G., Caro V., (2024). Green next-generation excipients enriched in

polyphenols from recovery of grape processing waste black bentonite: Influence of unconventional extraction solvents on antioxidant properties and composition. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 37, 101414. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101414>.

5. Siriwardena D., James R., Dasu K., Thorn J., Iery R., Pala F., Schumitz D., Eastwood S., Burkitt N., (2021). Regeneration of per- and polyfluoroalkyl substance-laden granular activated carbon using a solvent based technology. *Journal of Environmental Management*, 289, 112439. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112439>.

6. Liu Z., Wang L., Yang X., Babaei M., (2024). Isopropanol-Acetone-Hydrogen chemical heat pumps for improved heat recovery from geothermal resources, A case study in China. *Renewable Energy*, 237(C), 121730. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121730>.

7. Mutto A., Mahawer K., Shukla A., Gupta S., (2022). Understanding butanol recovery and coupling effects in pervaporation of Acetone-Butanol-Ethanol (ABE) solutions: A modelling and experimental study. *Journal of Membrane Science*, 658, 120711. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.120711>.

8. Zhou P., Liu Q., Zhang Z., (2025). Coupled modeling of solvent evaporation and thin film evolution in spin coating. *Applied Thermal Engineering*, 279(C), 127662. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.127662>.

9. Chen H., Du K., (2025). High mechanical strength cellulose microspheres with homogeneous regeneration framework achieved by mild solvent exchange strategy for adsorption of flavonoids. *Separation and Purification Technology*, 364(3), 132590. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.132590>.

10. Bagherjeri M., Bayattork M., Haque A., Mahdavi Z., Rezaie F., Zhang Y., Naebe M., (2025). Green approach to denim waste recycling using N-methylmorpholine N-oxide and deep eutectic solvent for regenerated cellulose. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(6), 119944. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.119944>.

11. Gasós A., Gall L., Mazzotti M., (2025). Recycling solvent and managing impurities: Screening industrial wastes for cyclic operation in indirect mineral

carbonation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(5), 118006. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.118006>.

12. Bousmaha M., Belmonte J., Nehari D., Villena-Ruiz R., Honrubia-Escribano A., Gómez-Lázaro E., (2025). Membrane distillation module powered by low-temperature solar thermal systems: Modeling and transient performance analysis. *Desalination and Water Treatment*, 323, 101365. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101365>.

13. Ahmed O., Algburi S., Daoud R., Khaoula H., Ali Z., Aziz E., (2025). Performance of the solar distillation systems integrated with PV/thermal systems: a review. *Energy Conversion and Management*: X, 27, 101212. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101212>.

14. Malik A., Bamikole J., Narasigadu C., (2025). Measurement and modelling of thermodynamic and physical properties for the molecular interaction of binary mixtures of Propylbenzene with acetone, isooctane and 1-butanol. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 107614. <https://doi.org/10.1016/j.jct.2025.107614>.

15. Sun Y., Wang X., Lee H., (2024). Comprehensive investigation of solvent effects on BiOBr synthesis: Understanding the photocatalytic mechanisms of enrofloxacin and its degradation pathway. *Catalysis Communications*, 187, 106877. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2024.106877>.

16. Alimi B., Pathania S., Wilson J., Duffy B., Celayeta F., (2025). Sustainable enzymatic extraction of high-purity chitin from button mushroom (*Agaricus bisporus*) off-production waste: Influence of alkaline pretreatment on physicochemical properties. *Future Foods*, 11, 100657. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2025.100657>.

17. Dadson J., Arthur V., Asiedu N., Akoto O., (2024). Evaluation of physicochemical parameters as indicators of diesel adulteration. *Heliyon*, 10(7), e36945. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36945>.

18. Guo W., Pu J., Wang J., He F., (2026). Effects of compound-angled film cooling jet on thermal and mechanical performances of thermal barrier coatings. *Applied Thermal Engineering*, 285, 129237. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.129237>.

Відомості про авторів / About the Authors

Жаров Сергій Леонидович (Zharov Serhii) - аспірант кафедри технологій переробки нафти, газу та твердого палива, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0038-2802>; e-mail: slzharov1977@gmail.com

Квасов Олександр Вікторович (Kvasov Oleksandr) - аспірант кафедри технологій переробки нафти, газу та твердого палива, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2948-692X>; e-mail: 0099778@gmail.com

Кузін Дмитро Костянтинович (Kuzin Dmytro) - аспірант кафедри технологій переробки нафти, газу та твердого палива, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5304-5632>; e-mail: kuzin21061985@gmail.com

Марченко Віктор Васильович (Marchenko Viktor) - аспірант кафедри технологій переробки нафти, газу та твердого палива, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5287-5415>; e-mail: 0997727@gmail.com

Набока Сергій Андрійович (Naboka Serhii) - аспірант кафедри технологій переробки нафти, газу та твердого палива, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3632-997X>; e-mail: naseanua@gmail.com

Дата надходження статті: 10.02.26 р.

Дата прийняття до друку: 20.03.26 р.