

А. О. КЕЛЕМЕШ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри агроінженерії та автомобільного транспорту
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0001-9429-8570

А. М. ХМЕЛЕНКО

здобувач ступеня доктора філософії
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0009-0007-5357-7152

КОМБІНОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ВІДПРАЦЬОВАНИХ МОТОРНИХ ОЛИВ ДЛЯ ІНЖЕНЕРНИХ ГІДРОСИСТЕМ

У статті здійснено узагальнення та порівняльний аналіз сучасних методів очищення і регенерації відпрацьованих моторних олів з позицій їх технічної ефективності, можливостей практичного впровадження та доцільності використання в інженерних системах. Актуальність дослідження зумовлено зростанням обсягів утворення відпрацьованих мастильних матеріалів, високою вартістю первинних нафтопродуктів, а також необхідністю зменшення негативного впливу відходів на довкілля та виробниче середовище. Показано, що відпрацьовані моторні оливи зберігають значний потенціал для повторного використання за умови застосування ефективних технологій очищення.

У роботі систематизовано фізичні, фізико-хімічні, хімічні та комбіновані методи очищення моторних олів. До фізичних методів віднесено відстоювання, фільтрацію, центрифугування, вакуумну дистиляцію, магнітне та ультразвукове очищення. Розглянуто їх переваги, обмеження та область раціонального застосування. Проаналізовано фізико-хімічні методи, зокрема адсорбцію, екстракцію розчинниками, коагуляцію, флокуляцію, мембранні та термоокислювальні процеси, які забезпечують більші глибоке видалення продуктів старіння та окислення олів. Особливу увагу приділено хімічним методам очищення, включно з кислотно-лужною обробкою та гідроочищенням, як таким, що дозволяють отримувати базові оливи з властивостями, наближеними до первинних.

На основі аналізу літературних джерел встановлено, що жоден з одиничних методів не забезпечує повного відновлення експлуатаційних властивостей моторної оливи в умовах підприємств малого та середнього масштабу. Обґрунтовано доцільність застосування комбінованих технологій очищення, які поєднують послідовні стадії відстоювання, відцентрового розділення, коагуляційної обробки, сепарації та тонкої фільтрації. Показано, що такі методи дозволяють видаляти механічні домішки та частинки розміром до 1 мкм і забезпечують отримання очищеної оливи, придатної для використання в гідравлічних системах і гідроприводах спрощеної конструкції. Отримані узагальнення можуть бути використані при розробленні та виборі технологічних схем регенерації відпрацьованих моторних олів для інженерних застосувань.

Ключові слова: моторна олива, відпрацьована олива, очищення олів, регенерація мастильних матеріалів, комбіновані методи очищення, фільтрація, центрифугування, адсорбція, гідравлічні системи.

А. О. KELEMESH

PhD, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Agricultural Engineering
and Automobile Transport
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0001-9429-8570

А. М. KHMELENKO

Postgraduate Student
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0009-0007-5357-7152



COMBINED TECHNOLOGIES FOR THE PURIFICATION OF USED MOTOR OILS FOR ENGINEERING HYDRAULIC SYSTEMS

The paper presents a comprehensive review and comparative analysis of modern methods for the purification and regeneration of used motor oils from the standpoint of their technical efficiency, practical applicability, and feasibility for engineering systems. The relevance of the study is driven by the growing volumes of used lubricating materials, the increasing cost of primary petroleum resources, and the necessity to reduce the negative environmental and industrial impacts associated with improper disposal of waste oils. It is demonstrated that used motor oils retain a significant potential for reuse provided that effective purification technologies are applied.

The study systematizes physical, physicochemical, chemical, and combined methods of motor oil purification. Physical methods considered include sedimentation, filtration, centrifugation, vacuum distillation, magnetic separation, and ultrasonic treatment. Their advantages, limitations, and areas of rational application are analyzed. Particular attention is given to physicochemical methods such as adsorption, solvent extraction, coagulation, flocculation, membrane separation, and thermo-oxidative treatment, which enable deeper removal of aging products and oxidation compounds. Chemical purification methods, including acid-alkali treatment and hydrotreating, are also examined as technologies capable of restoring base oils with properties close to those of virgin lubricants.

Based on the analysis of scientific literature, it is established that no single purification method ensures complete restoration of the performance properties of used motor oils, especially under the conditions of small and medium-scale industrial enterprises. The expediency of applying combined purification technologies is substantiated. Such technologies integrate sequential operations of sedimentation, centrifugal separation, coagulation treatment, phase separation, and fine filtration. It is shown that combined methods make it possible to remove mechanical impurities and contaminant particles with sizes up to 1 μm , thereby producing purified oils suitable for reuse as working fluids in hydraulic systems and simplified hydraulic drives. The presented generalizations may be applied in the development and selection of technological schemes for the regeneration of used motor oils in engineering practice.

Key words: motor oil, used oil, oil purification, lubricant regeneration, combined purification methods, filtration, centrifugation, adsorption, hydraulic systems.

Постановка проблеми

Моторна олива виготовляється переважно з нафти, яка є обмеженим, невідновлювальним ресурсом. Це означає, що в майбутньому її виготовлення буде проблематичним через брак нових запасів нафти. Це у свою чергу буде супроводжуватися зростанням цін на останню. А тому пошук нових видів палива наразі актуалізовано. Перехідним етапом у цьому тривалому та наукомісткому процесі, на нашу думку, є регенерація відпрацьованої моторної оливи, різні аспекти якої нині активно дискутуються у світі. Крім того проблема забруднення навколишнього природного середовища скиданням відпрацьованої моторної оливи також потребує нагального вирішення, зокрема, шляхом переробки останньої. До того ж регенерація відпрацьованих моторних олив не позбавлена економічних зисків. На практиці використовуються різні методи переробки, а робота над їх удосконаленням та пошуком нових методів, зокрема комплексних, триває. У цьому сенсі за останні десятиліття було розроблено низку методів переробки, спрямованих на вирішення екологічних, технічних та економічних проблем, пов'язаних з відпрацьованими оливами [18]. Відповідно, обрана нами тематика наукового дослідження, не тільки не втрачає актуальності, але й набуває з часом більшої значущості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Більш відомі методи очистки моторної оливи згруповані як фізичні, хіміко-фізичні, хімічні та комбіновані [1, 4, 5]. Розглянемо переваги і недоліки цих способів очищення, виходячи з наявних літературних даних.

Розглядаючи фізичні методи очищення, зазначимо:

Відстоювання – перша і обов'язкова операція процесу регенерації. Механічні домішки і вода, що знаходяться в оливі в зваженому стані, осідають протягом 2-18 годин у залежності від температури нагріву та висоти стовпа рідини. Відстій застосований на принципі осадження частинок під дією їх сили тяжіння. Швидкість осадження (з рівняння Стокса) частинок тим більше, чим більше їх розмір і питома вага і менша в'язкість рідини. В першу чергу випадають в осад металеві частинки і смолянисті речовини. Відстій відбувається на основі осадження механічних частинок, які мають густину, яка перевищує густину оливи в полі сили тяжіння.

Осадження часток під дією відцентрових сил проводять в гідроциклонах, центрифугах і сепараторах. Пристрої для очищення рідини в полі відцентрованих сил прості за конструкцією, компактні. Сепаратори прості в обслуговуванні, мають високу продуктивність і невелику вартість. При очищенні рідин в полі відцентрованих сил відцентрове прискорення істотно більше гравітаційного прискорення, що дозволяє збільшити швидкість видалення з оливи домішок [4].

Відстій в циклонах. Він найбільш ефективний при очищенні стічних вод від тонкодисперсних твердих частинок. Повноту очищення в центрифугі за один прохід через ротор можна визначити коефіцієнт очищення оливи. Ефективність роботи пристроїв, що використовують для видалення з рідин небажаних домішок, залежить від фізичних властивостей рідини і твердої фази (в'язкість, питома вага, діаметр твердих частинок), а також

конструктивних параметрів циклонів. Відцентровий спосіб очищення рідини дозволяє видаляти домішки розмірами від 2...3 мкм і вище. Недоліками даного способу є те, що зі збільшенням в'язкості рідини ефективність очищення різко знижується, крім того з масла не видаляються продукти окислення і термічні розкладання. Органічні сполуки, смолисті і асфальтові речовини, що мають розміри менше 1 мкм і знаходяться в оливі в колоїдному стані, які не будуть видалені з оливи фізичними способами. Колоїдні системи знаходяться в кінетичній рівновазі, володіють великим надлишком поверхневої енергії, що веде до термодинамічної нестійкості таких систем.

При броунівському русі колоїдні частинки вільно зближуються на відстань до 10^{-7} м, однак подальшому їхньому зближенню перешкоджає надлишковий тиск, що діє з боку тонкого шару та обмежують його поверхні. Виникнення цього шару обумовлено впливом електростатичних полів. Ідея коагуляції полягає в нейтралізації цих полів шляхом добавки до відпрацьованої оливи так званих коагуляторів. Дані речовини нейтралізують електростатичні поля, що сприяють зближенню колоїдних частинок і об'єднанню їх у великі конгломерати, що дозволяє фізичними методами видалити ці речовини з оливи [6].

В іншому способі в процесі фільтрації використовується реальна мембрана. Процес здійснюється при постійній температурі. Ефективність фільтрації оливи залежить від типу фільтра і від використаних фільтрувальних матеріалів. Тонкість фільтрації до 5 мкм. У міру забивання фільтрів збільшується їх гідравлічний опір і поліпшується тонкість очищення. Недоліком фільтрації є недостатня брудоемність фільтрів і неможливість видаляти з оливи органічні сполуки і частки, що утворюються в ній, які мають розміри нижче 3 мкм. Як наслідок, після очищення має темний колір і неприємний запах. Освітлення оливи можливе тільки при ультра і мікрофільтрації.

Напівпроникні мембрани забезпечують поділ на поверхні матеріалу, їх пори недоступні для затримки компонента і тому не повинні забиватися.

Для збільшення продуктивності фільтрації через недостатню брудоемність процес фільтрації організовують таким чином, що мембрана розділяє потік на дві складові, одна з них проходить через мембрану, а інша очищає поверхню мембрани від осілих на неї частинок. У звичайних фільтрах вся рідина проходить через фільтр.

Аналізуючи дані роботи [7] по дослідженню плоскопаралельних мембран з полісілану, слід зазначити, що при тиску 0,3МПа і температурі 25 °С питома продуктивність складала $q = 5,9$ л/(м² · год) з коефіцієнтом очищення 87,8 %.

Проведений аналіз фізичних способів показав, що жоден із способів не задовольняє вимогам, що пред'являються до регенерації масла безпосередньо в підприємствах агропромислового комплексу.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є пошук шляхів підвищення ефективності використання відпрацьованої моторної оливи шляхом застосування сучасних комбінованих методів очищення з подальшим використанням в якості робочих рідин для відносно простих гідравлічних систем та гідроприводів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Кожного дня у світі виробляється та використовується величезна кількість різноманітних марок оливи. За існуючими підрахунками тільки у Києві щодня зливається не менше 20 тис. тон відпрацьованої оливи [3], що актуалізує питання її відновлення та утилізації. На думку експертів, більшість відходів зливають до загальної каналізації, а це створює загрозу для довкілля [6].

Регенерація моторної оливи – це процес відновлення її властивостей для повторного використання. Процес є важливим з екологічної та економічної точки зору, оскільки зменшує кількість відходів та витрати на виробництво нової оливи. Проблема очищення відпрацьованих моторних олив є критично важливою як для збереження природних ресурсів [18], так і для екологічної стійкості загалом [12].

Існує кілька основних методів регенерації, які з урахуванням багатьох факторів, мають різну ефективність та справляють різний вплив на навколишнє середовище. Кожен з наведених нижче методів має свої переваги та недоліки.

Загалом усі методи очистки моторної оливи умовно поділяють на чотири групи: фізичні, хіміко-фізичні, хімічні та комбіновані. Наголосимо, що перелік конкретних методів, що входять до тієї чи іншої групи, не є вичерпним, а лише орієнтовним, що пов'язано із постійним розвитком науки та практики. Розглянемо приклади таких базових методів.

Фізичні методи включають процеси, що використовують фізичні властивості компонентів для їхнього розділення. Вони спрямовані на видалення переважно механічних домішок, води на легких фракціях без зміни хімічної природи оливи [4].

Відстоювання (седиментація) є найпоширенішим та недорогим методом, який передбачає видалення механічних домішок шляхом відстоювання оливи. Це дозволяє твердим забруднювачам та осад (що мають вищу густину, ніж олива) осісти на дно. Перевагою методу є те, що він не потребує додаткового обладнання, оскільки видаляє великі тверді частинки, воду та осад під дією сили тяжіння. Однак, він є тривалим у часі й не видаляє всі забруднення, зокрема, дрібнодисперсні домішки [5, 12, 11]. Відстоювання доцільно застосовувати як першу (попередню) стадію очистки. Після чого слід провести додаткові стадії регенерації. Отже, відстоювання не є ефективним для видалення емульгованої води, розчинених забруднень та менших частинок [12].

Фільтрація – пропускання оливи через фільтри різного ступеня очищення для видалення механічних домішок та частинок [12]. Можуть використовуватися різні типи фільтрів, наприклад, металеві сітчасті фільтри, картриджні

фільтри, центрифуги або фільтри з активованим вугіллям. Фільтрація має низьку енергозатратність [5]. Метод є простим та доступним, але не передбачає видалення розчинених смол, кислот і води. Він є неефективним для розчинених домішок та емульгованої води, проте є найбільш ефективним для видалення механічних домішок. До того ж фільтруючий елемент потребує утилізації або відновлення через засмічення [5, 12]. Тонка фільтрація (видалення частинок менше 10–15 мкм) є зазвичай завершальною операцією. Як і метод відстоювання, фільтрація часто використовується у якості попереднього етапу у процесі комплексного очищення відпрацьованої моторної оливи.

Центрифугування (відцентрова очистка) – використання відцентрової сили для розділення суміші на компоненти з різною густиною. Цей метод дозволяє ефективно видаляти воду та механічні домішки. Очищення відбувається достатньо швидко, але потребує високовартісного обладнання. Високошвидкісні центрифуги (10000–12000 об/хв) відрізняються високою сепараційною ефективністю. При цьому не видаляються розчинені домішки, а тому виникає потреба у доочищенні оливи [5].

Вакуумна дистиляція (випарювання) – видалення легких фракцій (бензину, газу) шляхом випарювання при зниженому тиску. Процес проводиться за високих температур (наприклад, 250–350 °C) і під високим вакуумом, щоб розділити фракції на основі їхніх точок кипіння [16]. Під час нагрівання відпрацьованого масла леткі компоненти випаровуються, а конденсовані пари збираються у вигляді очищеного масла. Тонкоплівкове вакуумне випарювання є достатньо перспективним і ефективним для видалення дизельного палива та води з відпрацьованої моторної оливи. Загалом метод вакуумної дистиляції вважається ефективним, проте потребує високих енергозатрат і складного обладнання [5]. Також процес може бути дорогим з точки зору капітальних витрат [6, 12]. Через складність обладнання застосування методу потребує також висококваліфікованого обслуговування [16, 17]. Тому він підходить для великих потужностей [17]. На відміну від вищеописаних методів за допомогою вакуумної дистиляції можна відновити базову оливу для повторного використання [12].

Магнітне очищення – видалення металевих частинок (дрібнодисперсних металевих продуктів зносу) за допомогою магнітних полів. Олива проходить через магнітний фільтр. Металеві домішки (залізо, сталь) притягуються магнітом і затримуються. У процесі проходження оливи через електромагнітний фільтр створюється електромагнітне поле, при цьому феромагнітні частинки утримуються в місцях контакту сталевих дробинок [2]. Перевагами цього методу є те, що видаляються абразивні частинки та зменшується знос двигуна. Проте він є неефективним для немагнітних частинок, наприклад, піску та сажі. Потреба у видаленні феромагнітних продуктів зносу (таких як залізо) є критичною для регенерації моторної оливи [10, 19]. Але через звужений спектр дії метод магнітного очищення застосовується лише як складова комплексних багатоступеневих технологій очищення оливи.

Ультразвукове очищення – руйнування забруднень ультразвуковими коливаннями. Ультразвукова обробка є одним із перспективних фізичних методів впливу, що застосовуються для очищення та поліпшення експлуатаційних властивостей відпрацьованих оливи [1, 13]. Метод характеризується достатньо глибоким очищенням, низьким рівнем забруднення, проте й високою вартістю. Крім того він є неефективним проти хімічних забруднень.

Фізико-хімічні методи часто використовуються для більш глибокого очищення, оскільки вони здатні видаляти як механічні домішки, так і деякі продукти старіння та окиснення.

Адсорбція передбачає використання пористих матеріалів, таких як активоване вугілля, цеоліти або глини, для поглинання органічних кислот, смол та інших домішок. Метод характеризується відносною екологічністю, але його ефективність обмежена проти важких відкладень [8, 11, 12]. Адсорбція застосовується для первинної очистки, в тому числі для фінального освітлення [16, 20]. Очищення та регенерація відпрацьованих моторних оливи часто проводиться з використанням локальних видів адсорбентів. У США більше половини усіх базових оливи вторинної переробки отримують внаслідок застосування методу адсорбції [6]. При цьому використовуються активовані глини, які походять з самої Америки. Частина використовуваних глини для процесу адсорбції моторних оливи в Україні купують саме у США. Загалом метод має високу ефективність видалення широкого спектру забруднень та характеризується балансом між ефективністю та сталим розвитком, хоча необхідно враховувати вартість та доступність адсорбуючих матеріалів [12]. Досліджуваний метод, не дивлячись на усі переваги, не позбавлений недоліків. Зокрема, у процесі його застосування утворюється велика кількість відпрацьованого сорбенту, який важко утилізувати [4]. Також з оливи може бути видалено присадки, наприклад, інгібітори окислення [7].

Екстракція розчинником використовує розчинники для розчинення домішок з масла. Потім розчинник відокремлюється, залишаючи очищену оливу. Метод заснований на вибіркового розчиненні окремих речовин (кисневих, сірчистих, азотних сполук, поліциклічних вуглеводнів). Зазвичай використовувани розчинники включають гексан, толуол, пропан, 1-бутанол, метил етил кетон (МЕК), ацетон [15, 18]. Метод вирізняється ефективним видаленням важкорозчинних домішок, включно з присадками [12, 17], але потребує подальшого очищення від розчинника. Крім того, застосування згаданого методу породжує виклики щодо утилізації розчинників та потенційного впливу на навколишнє середовище [12] та потребує кваліфікованого персоналу [16, 17].

Коагуляція – створення великих частинок домішок, які потім легко видаляються фільтруванням або відстоюванням. Позитивним є те, що добре видаляються важкорозчинні домішки. Але очищена у такий спосіб олива потребує подальшого очищення, а коагулянт є високовартісним [20].

Одним з різновидів коагуляції є флокуляція – використання спеціальних реагентів (флокулянтів, наприклад, полімери, крохмаль, желатин) для агрегації дрібних частинок у більш утворення для більш легкого відфільтрування. Відокремлення відбувається шляхом фільтрації або центрифугування. Використання цього методу призводить до підвищення ефективності фільтрації, чистоти оливи, але вимагає підбору відповідного реагенту. Флокуляція може бути використана у поєднанні з екстракцією для регенерації відпрацьованої мастильної оливи.

Термоокислювальне очищення полягає у нагріванні мінеральної оливи до 200–400 °С у присутності кисню або каталізаторів для розкладання шкідливих сполук. При цьому відбувається руйнування смолистих сполук і часткова регенерація базової оливи, а виділені газоподібні продукти відводяться. Метод характеризується оновленням властивостей оливи, ефективним виділенням важких домішок та, разом з тим, високими енергетичними витратами і можливістю утворення токсичних випарувань [14, 20].

Мембранне очищення передбачає використання напівпроникних мембран для розділення компонентів у потоці, що є особливо ефективним для видалення дрібнодисперсних продуктів старіння. Саме розділення продуктів у потоці, тобто без осадження на фільтроматеріалі осаду, який з часом закупорює робочу пористу поверхню фільтра, є тією характеристикою, що відрізняє мембранне очищення від традиційних методів фільтрування. В ході очистки використовуються пористі мембрани, наприклад, з поліефірсульфону, поліакрилонітрилу, полівініліденфториду, для розділення забруднень за розміром [18]. Метод вважається ефективним щодо видалення дрібних частинок, емульгованої води і деяких розчинених домішок, ресурсозберігаючим, проте дорогим [16]. Окрім того, що мембрани мають доволі високу вартість, вони також можуть бути засміченими, що знижує ефективність очищення відпрацьованої моторної оливи [12].

Хімічні методи. Кислотно-лужне очищення полягає у використанні кислот та лугів для осадження та розчинення забруднень. При цьому олию змішують із сірчаною або іншою кислотою, що сприяє коагуляції домішок. Після цього додається лужний розчин, який нейтралізує кислоту та видаляє залишкові кислоти і продукти окислення. Уже очищена олива промивається водою та висушується. Застосування даного методу характеризується високою ефективністю очистки при достатньо простому апаратному супроводі [6]. Разом з тим метод передбачає використання агресивних реагентів та утворення небезпечних відходів. Донедавна це був найпоширеніший метод очистки моторної оливи у світі, особливо в країнах, де не було доступу до сучасних технологій регенерації. Однак сьогодні його застосування значно скоротилося через екологічні проблеми та заміну його більш екологічними альтернативами, такими як гідроочищення та адсорбційне очищення.

Гідроочищення передбачає використання водню для відновлення молекул оливи та видалення шкідливих сполук. Олива нагрівається і піддається дії водню під високим тиском у присутності каталізатора. Відбувається руйнування сірчаних і кисневмісних сполук. Слід зазначити, що метод гідроочищення вирізняється високою якістю очищення і відновлення властивостей оливи. Але процес загалом є складним та потребує дороговартісного обладнання [5, 16]. Також цей метод є найпоширенішим і одним з найефективніших у світі, оскільки дозволяє отримати очищену моторну оливу з характеристиками, близькими до нової. Він активно використовується на нафтопереробних заводах та у підприємствах, що спеціалізуються на регенерації відпрацьованих мастил. Разом з тим для застосування на невеликих підприємствах він є надто вартісним. Тому є економічно вигідний лише при переробці дуже великих обсягів відпрацьованих олив (понад 50–60 тис. т/рік) [5].

Очищення реагентами – додавання спеціальних хімічних реагентів (поліфосфатів, карбонатів, комплексоутворювачів) для осадження та нейтралізації шкідливих сполук. Метод передбачає подальшу фільтрацію або відстоювання. Позитивним є швидкість очищення та можливість адаптації під конкретний тип забруднення. Проте цей метод не завжди підходить для глибокого очищення.

Комбіновані методи очистки моторної оливи поєднують у собі вищеописані технології у різних конфігураціях їх поєднання. Застосування таких методів з однієї сторони може забезпечити більш якісне очищення оливи, але й збільшує кількість викликів. Зокрема, вибір комбінованого методу позначається на його вартості, оскільки при використанні декількох технологій можуть знадобитися спеціалізоване обладнання, хімічні реагенти чи інші засоби. Складність полягає також у процедурах контролю окремих складових комбінованого методу [9, 12, 14, 16]. При виборі комбінації методів враховують вимоги до якості регенованої оливи, наявні ресурси та екологічні нормативи.

Висновки

За результатами оглядових порівняльних досліджень найбільшу технологічну перевагу можливо надати комбінованому методу очищення відпрацьованих мастильних матеріалів. Такий метод може об'єднувати низку послідовних технологічних очисних операцій: відстоювання відпрацьованої оливи, центрифугування, обробку оливи коагулятором, сепарація, тонка фільтрація. До переваг даного методу можливо віднести видалення з відпрацьованої моторної оливи частинок та механічних домішок, геометричними розмірами – не більше 1 мкм.

Очищені за допомогою такого методу оливи більш доцільно використовувати в гідравлічних системах та гідравлічних приводах спрощеної конструкції, наприклад в гідросистемах, де джерелами енергії є гідравлічні насоси шестеренного типу, використовуються золотникові гідророзподільники з мускульним керуванням, робоча температура рідини не перевищує 70 °С, номінальний тиск в гідросистемі – до 12,5 МПа.

Список використаної літератури

1. Уминський С., Макачук В., Королькова М., Дмитрієва С., Житков С. Гідродинамічне обладнання для регенерації відпрацьованих мастил. *Аграрний вісник Причорномор'я*. 2019. Вип. 95. С. 181–187. <https://doi.org/10.37000/abbsl.2019.95.26>
2. Журавель Д. П. Забезпечення надійності гідросистем сільськогосподарської техніки шляхом очищення робочих рідин. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету : електронне наукове фахове видання*. 2020. Вип. 10, том 2. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2020-2-3>
3. Куди дівається відпрацьована моторна олива? *Ecointel*. URL: <https://ecointel.com.ua/kudy-divayetsya-vidpraczuвана-motorna-oliva/> (дата звернення: 10.01.2026).
4. Оливи. Моторні, турбінні, гідравлічні та трансмісійні: властивості та якість. Підручник / С. Бойченко, А. Пушак, П. Топольницький та ін.; за ред. проф. С. Бойченка. К. : «Центр учбової літератури», 2019. 323 с.
5. Korchak B., Hrynshyn O., Chervinsky T., Pyshyev S. Functional-cost analysis of methods of regeneration of used mineral motor oils. *Chemistry, Technology and Application of Substances*. 2021. Vol. 4, No. 2. P. 33–39. <https://doi.org/10.23939/ctas2021.02.033>
6. Чайка О. Г., Чайка Ю. А. Порівняльний аналіз методів очищення відпрацьованих оливок на Україні та за її межами. *Вісник НУ «Львівська політехніка»*. 2009. Вип. 664. С. 224–228. URL: https://vlp.com.ua/files/55_6.pdf (дата звернення: 10.01.2026).
7. Adesina L. M., Saadu K., Ajenikoko G. A. Transformer Oil Regeneration as a Panacea for Electric Power Utility Company's Equipment Optimization. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2019. Vol. 8, Issue 2. P. 2160-2167. <https://doi.org/10.35940/ijrte.B2364.078219>
8. A. A. Aboje, A. A. Jibril, H. Uthman, N. Bello. Analysis of Acid Options in the Purification of Spent Motor Engine Oil Using Acidified Clay. *Technology in Engineering Management & Applied Science*. 2024. Vol. XIII, Issue IX. P. 122–130. <https://doi.org/10.51583/IJLTEMAS.2024.130912>
9. Cabrera-Escobar C., Moreno-Gutiérrez J., Rodríguez-Moreno R., Pájaro-Velázquez E., Calderay-Cayetano F., Durán-Grados V. A Review on Global Recovery Policy of Used Lubricating Oils and Their Effects on the Environment and Circular Economy. *Environments*. 2025. № 12, 135. <https://doi.org/10.3390/environments12050135>
10. Ratiu S. A., Mihon N. L., Laza I., Armioni M. D. A review on the contamination of used engine oil. *Ingineria automobilului*. 2020. № 57. P. 20–25. <https://www.researchgate.net/publication/346573076> (application date: 10.01.2026).
11. Aliev A., Ganieva S., Smanov B., Adizov B., Rakhimov B. Environmentally friendly regeneration of used energy oils. *VIII International Conference on Advanced Agritechnologies, Environmental Engineering and Sustainable Development (AGRITECH-VIII 2023)*. 2023. Vol. 390. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339005043>
12. Hassanpour M. Transformer Oil Generation and Regeneration Techniques Based on Recent Developments (A Review). *International Journal of Petroleum Technology*. 2021. Vol. 8. P. 24–42. <https://doi.org/10.15377/2409-787X.2021.08.3>
13. Korchak B., Hrynshyn O., Chervinsky T., Nagursky A., Stadnik V. Integrated regeneration method for used mineral motor oils. *Chemistry & Chemical Technology*. 2021. Vol. 15, No. 2. P. 239–246. <https://doi.org/10.23939/chcht15.02.239>
14. Mu'azu M., Abdulsalam S., El-Nafaty U. A. Optimisation of Base Oil Regeneration Using Response Surface Methodology From Spent Lubricating Oil Through Binary Solvent Extraction Process. *Path of Science*. 2024. Vol. 10. No 10. P. 2048–2057. <https://doi.org/10.22178/pos.109-25>
15. Parekh K., Gaur R., Shahabuddin S. Recent Advances in Reclamation of Used Lubricant Oil. Tailored Functional Materials: Select Proceedings of MMETFP 2021 (Springer Proceedings in Materials, 15). P. 273–282. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2572-6_21
16. Ahmed D. J., Raad M., Chali M., Bahjat A. Purification of Used Lubricating Oils Using Vacuum Distillation. *Journal of Petroleum Research and Studies*. 2024. Vol.14, № 1. P. 111–130. <http://doi.org/10.52716/jprs.v14i1.766>
17. Ratiu S. A., Mihon N. L., Armioni M. D. Study On The Recycling Methods Of Used Engine Oil. *Ingineria automobilului*. 2020. № 55. P. 20-22. URL: <https://www.researchgate.net/publication/342899290> (application date: 10.01.2026).
18. Zelenko Y., Bezovska M., Kuznetsov V., Muntian A. Resource Saving and Eco-Friendly Technology for Disposal of Used Railroad Engine Oils. *Middle Pomeranian Scientific Society of the Environment Protection*. 2020. Vol. 22. P.171–180. <https://www.researchgate.net/publication/348430877> (application date: 10.01.2026)
19. Sadraddin A. S., Haji J. A. Regeneration of Engine Used Oils by Solvent Extraction. *Iraqi Journal of Science*. 2022. Vol. 63, No. 12. P. 5119–5130. <https://doi.org/10.24996/ij.s.2022.63.12.3>
20. Korchak B., Hrynshyn O., Chervinsky T., Shapoval P., Nagursky A. Thermooxidative regeneration of used mineral motor oils. *Chemistry & Chemical Technology*. 2020. Vol. 14, No. 1. P. 129–134. <https://doi.org/10.23939/chcht14.01.129>

References

1. Uminskij, S., Makarchuk, V., Korol'kova, M., Dmitrieva, S., & Zhitkov, S. (2019). Hydrodynamic equipment for the regeneration of waste oils. *Agrarian Herald of the Black Sea Region*, 95, 181–187. <https://doi.org/10.37000/abbsl.2019.95.26>
2. Zhuravel, D. (2020). Ensuring the reliability of hydraulic systems in agricultural machinery by cleaning working fluids. *Scientific Bulletin of Tavria State Agrotechnological University: electronic scientific professional publication*, 10(2). <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2020-2-3>
3. Where does used motor oil go? Ecointel. URL: <https://ecointel.com.ua/kudy-divayetsya-vidpracovana-motorna-oliva/> (application date: 10.01.2026).
4. Boichenko, S., Pushak, A., & Topolnitsky, P. (2019). *Oils. Engine, turbine, hydraulic and transmission oils: properties and quality* (S. Boichenko, Eds.). Centre for Educational Literature.
5. Korchak, B., Hrynyshyn, O., & Pyshyev, S. (2021). Functional-cost analysis of methods of regeneration of used mineral motor oils. *Chemistry, Technology and Application of Substances*, 4(2), 33–39. <https://doi.org/10.23939/ctas2021.02.033>
6. Чайка, О., & Чайка, Ю. (2009). Порівняльний аналіз методів очищення відпрацьованих олів на Україні та за її межами. *Вісник НУ «Львівська політехніка»*, (664), 224–228. https://vlp.com.ua/files/55_6.pdf (дата звернення: 10.01.2026).
7. Adesina, L., Saadu, K., & Ajenikoko, G. (2019). Transformer Oil Regeneration as a Panacea for Electric Power Utility Company's Equipment Optimization. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(2), 2160–2167. <https://doi.org/10.35940/ijrte.B2364.078219>
8. Aboje, A., Jibril, A., Uthman, H., & Bello, N. (2024). Analysis of Acid Options in the Purification of Spent Motor Engine Oil Using Acidified Clay. *Technology in Engineering Management & Applied Science*, XIII(IX), 122–130. <https://doi.org/10.51583/IJLTEMAS.2024.130912>
9. Cabrera-Escobar, C., Moreno-Gutiérrez, J., Rodríguez-Moreno, R., Pájaro-Velázquez, E., Calderay-Cayetano, F., & Durán-Grados, V. (2025). A Review on Global Recovery Policy of Used Lubricating Oils and Their Effects on the Environment and Circular Economy. *Environments*, 12, 135. <https://doi.org/10.3390/environments12050135>
10. Ratiu, S., Mihon, N., Laza, I., & Armioni, M. (2020). A review on the contamination of used engine oil. *Ingineria automobilului*, 57, 20–25. <https://www.researchgate.net/publication/346573076> (application date: 10.01.2026).
11. Aliev, A., Ganieva, S., Smanov, B., Adizov, B., & Rakhimov, B. (2023). Environmentally friendly regeneration of used energy oils. *VIII International Conference on Advanced Agritechnologies, Environmental Engineering and Sustainable Development (AGRITECH-VIII 2023)*, 390. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339005043>
12. Hassanpour, M. (2021). Transformer Oil Generation and Regeneration Techniques Based on Recent Developments (A Review). *International Journal of Petroleum Technology*, 8, 24–42. doi: <https://doi.org/10.15377/2409-787X.2021.08.3>
13. Korchak, B., Grynshyn, O., Chervinsky, T., Nagursky, A., & Stadnik, V. (2021). Integrated regeneration method for used mineral motor oils. *Chemistry & Chemical Technology*, 15(2), 239–246. <https://doi.org/10.23939/chcht15.02.239>
14. Mu'azu, M., Abdulsalam, S., & El-Nafaty, U. (2024). A. Optimisation of Base Oil Regeneration Using Response Surface Methodology From Spent Lubricating Oil Through Binary Solvent Extraction Process. *Path of Science*, 10(10), 2048–2057. <https://doi.org/10.22178/pos.109-25>
15. Parekh, K., Gaur, R., & Shahabuddin, S. (2021). Recent Advances in Reclamation of Used Lubricant Oil. *Tailored Functional Materials: Select Proceedings of MMETFP 2021 (Springer Proceedings in Materials)*, 15, 273–282. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2572-6_21
16. Ahmed, D., Raad, M., Chali, M., & Bahjat, A. (2024). Purification of Used Lubricating Oils Using Vacuum Distillation. *Journal of Petroleum Research and Studies*, 14(1), 111–130. <http://doi.org/10.52716/jprs.v14i1.766>
17. Ratiu, S., Mihon, N., & Armioni, M. (2020). Study On The Recycling Methods Of Used Engine Oil. *Ingineria automobilului*, 55, 20–22. <https://www.researchgate.net/publication/342899290> (application date: 10.01.2026).
18. Zelenko, Y., Bezovska, M., Kuznetsov, V., & Muntian, A. (2020). Resource Saving and Eco-Friendly Technology for Disposal of Used Railroad Engine Oils. *Middle Pomeranian Scientific Society of the Environment Protection*, 22, 171–180. <https://www.researchgate.net/publication/348430877> (application date: 10.01.2026).
19. Sadraddin, A., & Haji, J. (2022). Regeneration of Engine Used Oils by Solvent Extraction. *Iraqi Journal of Science*, 63(12), 5119–5130. <https://doi.org/10.24996/ij.s.2022.63.12.3>
20. Korchak, B., Grynshyn, O., Chervinsky, T., Shapoval, P., & Nagursky, A. (2020). Thermooxidative regeneration of used mineral motor oils. *Chemistry & Chemical Technology*, 14(1), 129–134. <https://doi.org/10.23939/chcht14.01.129>

Дата першого надходження статті до видання: 11.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026