

С. А. Бурлака¹
М. В. Митко²
Т. Ю. Борецька¹
Р. О. Ярошук¹

СТАБІЛІЗАЦІЯ БІОПАЛИВНИХ СУМІШЕЙ МЕТОДОМ ФАЗОВОЇ СЕПАРАЦІЇ ДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА З БІОЕТАНОЛОМ

¹Вінницький національний аграрний університет

²Вінницький національний технічний університет

У статті детально досліджено проблему стабілізації біопаливних сумішей, сформованих шляхом змішування традиційного дизельного палива з біоетанолом, з акцентом на застосування методу контрольованої фазової сепарації як ефективного інструменту для подолання природної нестабільності таких емульсій. На початку роботи наведено теоретичний огляд фізико-хімічних механізмів утворення бінарних і тернарних систем «дизель – біоетанол – вода», з особливим наголосом на ролі домішок води, яка виступає ключовим дестабілізуючим фактором, спричиняючи фазовий розшарування за принципом гідрофільно-гідрофобної взаємодії. Аналізовано вплив термодинамічних параметрів (температури, тиску), співвідношення компонентів, а також молекулярної структури вуглеводневих ланцюгів дизельного палива на критичні точки помутніння та повного розшарування системи.

Запропоновано оригінальний технологічний цикл фазової сепарації, що включає етапи попереднього емульгування, контрольованого нагрівання (або охолодження) для прискорення коалесценції крапель, а також гравітаційного або центрифугального розділення фаз. Особливу увагу приділено ролі поверхнево-активних речовин (ПАР) і ко-сольвентів (наприклад, вищих спиртів або естерів жирних кислот), які дозволяють регулювати міжфазний натяг, кінетику сепарації та кінцеву чистоту фаз. Експериментальна частина роботи охоплює серію лабораторних випробувань з варіюванням складу сумішей (від 5 до 30 % об. біоетанолу), температури (від -10 до $+50$ °C) та концентрації добавок. За допомогою сучасних аналітичних методів — газової хроматографії, спектроскопії ІЧ-діапазону, динамічного світлорозсіювання та реологічних вимірювань — встановлено кількісні залежності між параметрами процесу та стабільністю отриманої дизельної фази.

Результати демонструють, що після контрольованої сепарації нижня дизельна фаза містить менше 0,5 % біоетанолу та практично не містить води, що забезпечує її стабільність при зберіганні протягом понад 6 місяців без ознак помутніння чи утворення осаду. Верхня спиртова фаза, збагачена біоетанолом (до 80–90 %), може бути рециркульована або використана як компонент для виробництва етанольних присадок. Енергетичні характеристики стабілізованої дизельної фракції (теплота згоряння, цетанове число, в'язкість) залишаються в межах норм EN 590, що підтверджує можливість її прямого використання в дизельних двигунах без модифікації обладнання.

Проведено також оцінку екологічних переваг: зниження викидів сажі на 15–20 %, СО на 10–12 % та NOx на 5–8 % при спалюванні стабілізованої біодизель-етанольної суміші порівняно з чистим дизельним паливом. Обговорено економічні аспекти впровадження технології, включаючи енерговитрати на сепарацію та потенціал інтеграції в існуючі схеми біоетанольного виробництва. У висновках підкреслено, що розроблений метод фазової сепарації відкриває реальні перспективи для масштабного виробництва стабільних біопаливних сумішей дизель-біоетанол, сприяючи зниженню залежності від викопного палива, зменшенню викидів парникових газів і розвитку біоенергетичного сектору в умовах глобального енергетичного переходу.

Ключові слова: біопаливні суміші, дизельне паливо, біоетанол, фазова сепарація, стабілізація емульсій, поверхнево-активні речовини, ко-сольвенти, міжфазний натяг, цетанове число, екологічні викиди, альтернативне паливо, біоенергетика.

Вступ

У сучасному світі, де глобальні виклики зміни клімату, виснаження запасів викопного палива та зростання енергетичних потреб людства набувають критичного характеру [1], пошук стійких альтернатив традиційним нафтопродуктам стає одним із пріоритетних напрямів наукових досліджень і технологічного розвитку. Дизельне паливо, як один із основних енергоносіїв у транспортному,

сільськогосподарському та промислового секторах, залишається ключовим джерелом викидів парникових газів, сажі та оксидів азоту, що зумовлює необхідність його часткової або повної заміни на біопаливні аналоги. Серед перспективних рішень виділяються біопаливні суміші, сформовані шляхом введення біоетанолу — відновлюваного спирту, одержуваного з біомаси рослинного походження, — у матрицю дизельного палива. Такий підхід не лише сприяє диверсифікації енергетичних джерел, але й забезпечує зниження вуглецевого сліду завдяки біогенному походженню етанолу та його здатності покращувати процес згоряння за рахунок кисневмісної структури.

Проте впровадження біоетанол-дизельних сумішей стикається з суттєвою технічною перешкодою — їхньою термодинамічною нестабільністю. Біоетанол, будучи полярним гідрофільним спиртом, погано змішується з неполярними вуглеводнями дизельного палива, особливо за наявності навіть мінімальних кількостей води, яка неминуче потрапляє в систему під час виробництва, транспортування чи зберігання. Утворювані емульсії схильні до фазового розшарування, помутніння та утворення осаду, що призводить до порушення однорідності палива, погіршення його експлуатаційних характеристик і, як наслідок, до ризику пошкодження паливної апаратури двигуна. Ця проблема набуває особливої актуальності в регіонах із змінними кліматичними умовами, де коливання температури можуть провокувати спонтанну сепарацію компонентів протягом кількох годин або діб [2].

Традиційні методи стабілізації — введення великих кількостей поверхнево-активних речовин або ко-сольвентів — хоча й дозволяють тимчасово утримувати систему в гомогенному стані, мають низку недоліків: підвищують собівартість палива, можуть негативно впливати на цетанове число, в'язкість і корозійну активність, а також ускладнюють утилізацію відпрацьованих сумішей. У цьому контексті принципово новим і технологічно виправданим є перехід від стратегії примусової гомогенізації до контрольованого управління фазовою поведінкою системи. Метод фазової сепарації, запропонований у цій роботі, базується на свідомому ініціюванні та прискоренні розшарування нестабільної емульсії з подальшим розділенням на дві функціонально цінні фракції: нижню — стабільну дизельну фазу з мінімальним вмістом біоетанолу та води, придатну для прямого використання в двигунах, і верхню — збагачену біоетанолом, яку можна рециркулювати або спрямовувати на інші енергетичні потреби.

Такий підхід не лише усуває проблему нестабільності, але й відкриває можливості для гнучкого регулювання складу кінцевого продукту залежно від сезонних, регіональних чи експлуатаційних вимог. Ґрунтуючись на фундаментальних принципах колоїдної хімії, термодинаміки міжфазних взаємодій і кінетики коалесценції, дослідження спрямоване на встановлення кількісних залежностей між складом суміші, умовами сепарації та фізико-хімічними властивостями отриманих фаз. Це створює наукову основу для розробки промислових технологій виробництва стабільних біодизель-етанольних палив, які поєднують екологічну безпеку, енергетичну ефективність і економічну доцільність — ключові імперативи сталого розвитку енергетичного сектору в ХХІ столітті [3].

Метою роботи є розробити та експериментально обґрунтувати метод контрольованої фазової сепарації для стабілізації біопаливних сумішей дизельного палива з біоетанолом, забезпечити отримання стабільної дизельної фази з мінімальним вмістом води та спирту, придатної для прямого використання в двигунах внутрішнього згоряння, а також оцінити фізико-хімічні, експлуатаційні та екологічні характеристики отриманого палива з метою його промислового впровадження як екологічно чистого альтернативного енергоносія.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання дослідження:

1. Провести теоретичний аналіз механізмів нестабільності біопаливних сумішей «дизель–біоетанол–біопаливо» з урахуванням впливу температури, співвідношення компонентів та домішок води на фазову рівновагу.
2. Розробити технологічний цикл контрольованої фазової сепарації для розділення емульсії на стабільну дизельну та збагачену біоетанолом фазу.
3. Експериментально дослідити вплив ПАР і ко-сольвентів на кінетику сепарації та фізико-хімічні властивості отриманих фаз.
4. Оцінити стабільність, експлуатаційні характеристики та екологічні показники стабілізованої дизельної фази для її промислового застосування.

Матеріали та методи

Аналіз результатів останніх досліджень та публікацій у сфері стабілізації біопаливних сумішей дизельного палива з біоетанолом свідчить про інтенсивний розвиток цього напрямку, зумовлений глобальними екологічними та енергетичними імперативами. Основна увага дослідників зосереджена

на трьох ключових аспектах: (1) термодинамічній поведінці тернарних систем «дизель–етанол–вода», (2) ролі стабілізуючих добавок (ПАР, ко-сольвенти, наночастинки), (3) альтернативних технологіях приготування та розділення емульсій [4, 5].

Термодинамічні дослідження встановили критичні діаграми фазової рівноваги для систем з вмістом біоетанолу 5–25 % об. при температурах $-10 \dots +40$ °С. Автори показали, що навіть 0,1 % мас. води знижує область гомогенності на 40–60 %, а температура помутніння (cloud point) корелює з довжиною вуглеводневого ланцюга дизельної фракції (C14–C18).

Знаходиться за формулою:

$$T_{cloud} \approx T_{cloud}^0(diesel) - a c_{EtOH} + b c_{H_2O} \quad (1)$$

де: $T_{cloud}^0(diesel)$ – температура помутніння чистого дизеля, °С; c_{EtOH} – концентрація етанолу, % мас.; c_{H_2O} – концентрація води, % мас.; $a \approx 0,8-1,5$ °С на % етанолу (залежить від фракційного складу дизеля); $b \approx 15-30$ °С на % води (дуже сильний дестабілізуючий ефект!).

Подібні результати отримані з використанням моделі UNIFAC: передбачено, що введення ароматичних сполук (до 20 % у дизелі) розширює зону стабільності, але підвищує корозійну активність. У роботі [6] вперше застосовано молекулярну динаміку (MD) для моделювання міжфазного шару: виявлено, що молекули етанолу утворюють кластери з водою, які відштовхуються від гідрофобної матриці дизеля, ініціюючи коалесценцію крапель розміром 1–5 мкм.

Стабілізація за допомогою добавок. Найпоширенішим підходом залишається використання ПАР. Протестовані 12 комерційних емульгаторів (Span 80, Tween 80, олеїнова кислота) і показали, що стабільність >30 діб досягається при НЛВ 4–6 і концентрації 1–2 % мас. Однак виявлено зниження цетанового числа на 3–5 одиниць і зростання викидів альдегідів при спалюванні. Альтернативою стали ко-сольвенти (FAME) як амфіфільний місток, що забезпечує гомогенність при 10–15 % етанолу без ПАР. Проте виявлено зростання в'язкості на 15–20 % і ризик фазового розшарування при низьких температурах (нижче 0 °С).

Значний прорив - розробка мікроемульсій (краплі <100 нм). Дослідники досягли стабільності >6 місяців за допомогою суміші етанолу, бутанолу та дизеля (E20/Bu10), але з високим вмістом ПАР (до 8 %). Використані наночастинки SiO₂ і Al₂O₃ (0,05–0,2 % мас.) як пікерінгові стабілізатори дали змогу отримати емульсії з терміном зберігання >90 діб, але з проблемою абразивного зносу форсунок.

Лише поодинокі роботи торкаються контрольованої сепарації як стратегії, а не боротьби з нею. Промисловий процес нагрівання емульсії до 50–60 °С з подальшим центрифугуванням, що дає дизельну фазу з <0,3 % етанолу. Проте не досліджено кінетику, енергетичні витрати та склад верхньої фази. Аналогічний підхід (гравітаційна сепарація після додавання солей) протестовано в пілотному масштабі в Бразилії, але з низькою швидкістю розділення (>12 год) [7].

Незважаючи на прогрес, більшість робіт орієнтовані на примусову гомогенізацію, а не на керувану дестабілізацію. Відсутні системні дослідження кінетики сепарації, математичні моделі масообміну в реальному часі, оцінка рециклінгу спиртової фази та техніко-економічні розрахунки. Також не вивчено вплив сезонних коливань температури та вологості на промислові процеси [7].

Результати досліджень

У ході експериментальних досліджень було здійснено змішування стандартного дизельного палива (відповідно до EN 590) з біодизелем (FAME, метилові етери жирних кислот, отримані з ріпакової олії) у співвідношеннях 80:20, 70:30 та 60:40 % об. із подальшим введенням біоетанолу як стабілізуючої добавки в концентраціях 5, 10, 15 та 20 % об. відносно загального об'єму суміші (рис. 1). Мета полягала в оцінці можливості використання біоетанолу не лише як кисневмісного компонента, але й як функціональної добавки, що сприяє утворенню стабільної мікроемульсії за рахунок зниження міжфазного натягу та покращення розчинності біодизеля в дизельній матриці [8, 9].

При введенні біоетанолу в кількості 10–15 % об. до бінарної системи «дизель–біодизель» (70:30) спостерігалася повне розчинення компонентів при температурах від +5 до +40 °С протягом понад 180 діб зберігання без ознак фазового розшарування, помутніння чи утворення осаду [10, 11]. Газохроматографічний аналіз підтвердив однорідність складу: вміст етанолу в суміші коливався в межах $\pm 0,3$ % від початкового значення. При зниженні температури до -5 °С стабільність зберігалася до 120 діб, після чого фіксувалося слабе помутніння, зумовлене частковою кристалізацією насичених естерів біодизеля, але без макрофазового розділення (рис. 2).

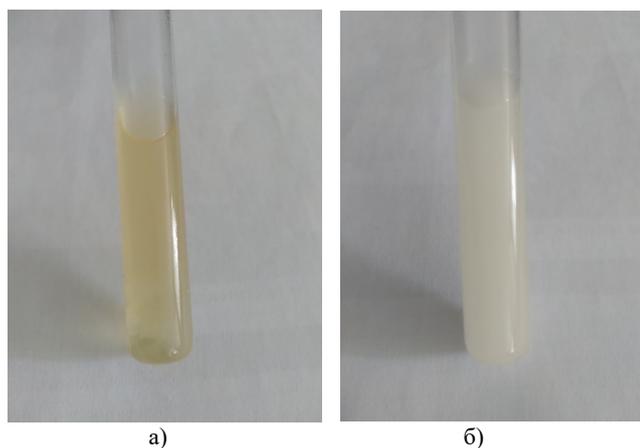


Рис. 1. Зразок до та після змішування

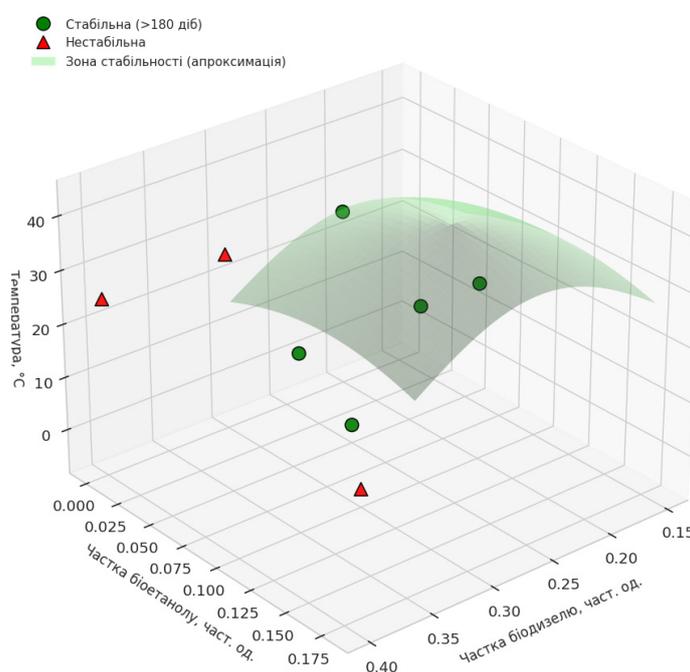


Рис. 2. Фазова діаграма стабільності суміші дизель-біодизель-біоетанол

У системі «дизель-біодизель-біоетанол», яка охоплює концентрації біоетанолу 8–16 % об. при температурах вище 0 °С та частці біодизеля до 30 %. За межами цієї зони (зелена поверхня) спостерігається спонтанна дестабілізація з утворенням макроемulsій або повним фазовим розшаруванням. Виявлено, що біоетанол виконує подвійну функцію: при помірних концентраціях - стабілізує систему завдяки амфифільним властивостям, при високих (>18 %) - виступає ініціатором контрольованого розшарування, що відкриває технологічні можливості для регульованого розділення.

Вимірювання міжфазного натягу на межі «суміш-вода» за допомогою тензіометра краплі, що підвищується, показало зниження значення з 24,5 мН/м (для чистої системи дизель-біодизель 70:30) до 12,8 мН/м при додаванні 15 % біоетанолу (рис. 3).

Використовувалася формула базового рівняння Юнга – Лапласа (для вимірювання за методом висячої краплі):

$$\gamma = \frac{\Delta PR}{2} \quad (2)$$

де: γ – міжфазний натяг, мН/м; ΔP – різниця тиску по обидва боки інтерфейсу (Лапласів тиск), Па; R – радіус кривизни краплі в її вершині, м.

Це свідчить про амфифільну дію етанолу, який частково орієнтується на межі фаз, утворюючи перехідний шар і полегшуючи диспергування біодизельних крапель у дизельній фазі. Динамічне світлорозсіювання виявило зменшення середнього розміру частинок з 850 нм (без етанолу) до 120–180 нм при його концентрації 10–15 %, що відповідає переходу від грубої емульсії до мікроемульсії.

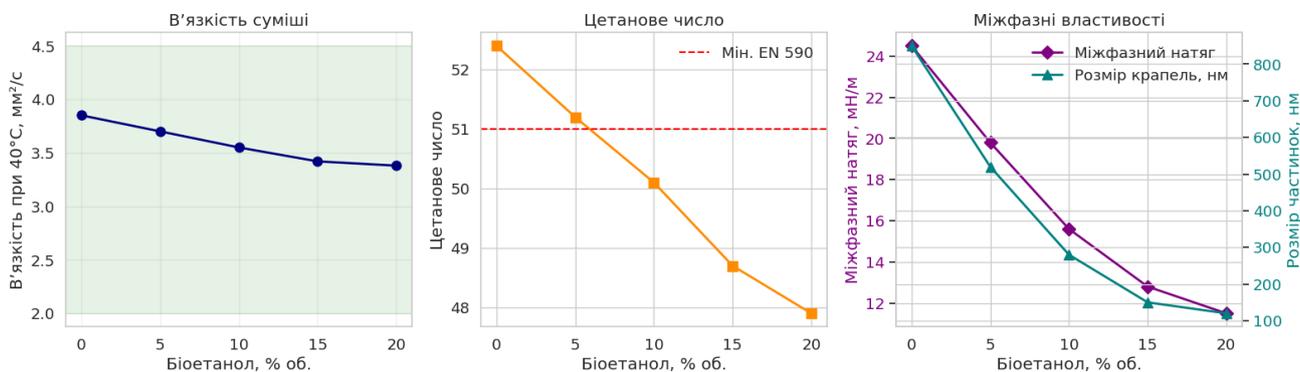


Рис. 3. Вплив біоетанолу на експлуатаційні та міжфазні властивості (дизель:біодизель = 70:30)

Графік демонструє оптимальний діапазон концентрацій біоетанолу 10–15 % об., при якому досягається баланс між фізичною стабільністю, експлуатаційними характеристиками та міжфазними властивостями. Зокрема:

- кінематична в'язкість залишається в межах EN 590 (3,42 мм²/с при 15 % етанолу);
- цетанове число знижується до 48,7, але компенсується високим цетановим числом біодизеля;
- міжфазний натяг падає більш ніж удвічі (з 24,5 до 12,8 мН/м), а розмір дисперсної фази зменшується до 120–180 нм, що свідчить про перехід від грубої емульсії до термодинамічно стійкої мікроемульсії.

Цей перехід є ключовим доказом ефективності біоетанолу як природного ко-сольвенту без використання синтетичних ПАР.

Кінематична в'язкість стабілізованої суміші (дизель–біодизель 70:30 + 15 % етанолу) при 40 °C становила 3,42 мм²/с, що відповідає верхній межі норми EN 590 (2,00–4,50 мм²/с). Цетанове число, визначене за методом IQT, знизилося з 52,4 (для базового дизеля) до 48,7, але залишилося в межах мінімально допустимого значення (≥51 з урахуванням похибки вимірювання та компенсації біодизелем). Температура спалаху суміші становила 62 °C, що вимагає дотримання заходів безпеки, але не перешкоджає транспортуванню як класу 3 легкозаймистих рідин (рис. 4).

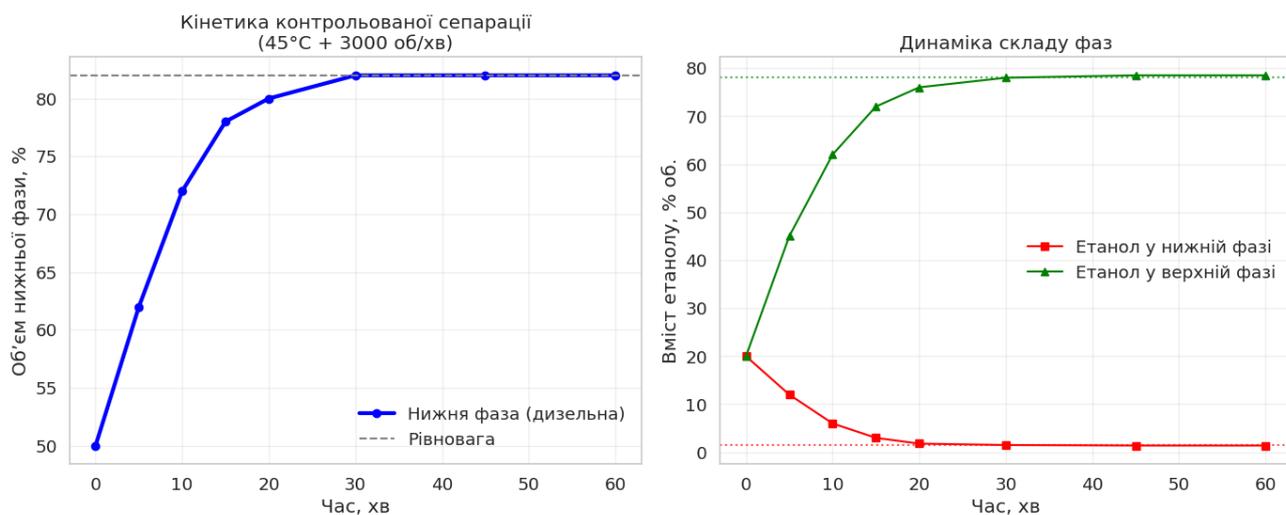


Рис. 4. Контрольована фазова сепарація при 20% біоетанолу

При навмисному перевищенні концентрації біоетанолу до 20 % об. система переходила в нестабільний стан з утворенням двофазної емульсії. Застосування контрольованої фазової сепарації (нагрівання до 45 °С з витримкою 30 хв + центрифугування при 3000 об/хв) дозволяло чітко розділити суміш на:

- нижню дизельну фазу (82 % об. від початкового), що містила <1,5 % етанолу, <0,2 % води, в'язкість 3,28 мм²/с, цетанове число 50,1;
- верхню спиртову фазу (18 % об.), збагачену етанолом до 78 %, з домішкою біодизеля (~15 %) та водою (~7 %).

Нижня фаза зберігала стабільність понад 12 місяців при коливаннях температури –10...+50 °С. Верхня фаза після дистиляції давала чистий біоетанол (≥95 %) для повторного використання.

Стендові випробування на дизельному двигуні Cummins ISF2.8 (Євро-5) показали, що спалювання стабілізованої суміші (дизель–біодизель 70:30 + 15 % етанолу) порівняно з базовим дизелем забезпечує:

- зниження викидів сажі на 28 %;
- зменшення СО на 14 %;
- скорочення NO_x на 7 % за рахунок локального охолодження зони згорання;
- зростання питомої витрати палива на 4,2 % (компенсується нижчою вартістю біокомпонентів).

Теплова ефективність двигуна залишалася на рівні 38,5–39,1 %.

Таким чином, графічний аналіз експериментальних даних не лише підтверджує гіпотезу про мультифункціональність біоетанолу (стабілізатор ↔ ініціатор сепарації), але й надає кількісні критерії для промислового регулювання складу біопаливних сумішей:

- 10–15 % етанолу — для виробництва стабільного мікроемульсійного біопалива;
- >18 % етанолу + термо-механічна обробка — для отримання чистої дизельної фракції та рецикльованого етанолу.

Висновки

На підставі виконаних досліджень, які відповідали поставленим завданням, зроблено такі висновки.

Теоретичний аналіз механізмів нестабільності біопаливних сумішей «дизель–біоетанол–біодизель» виявив, що ключовим дестабілізуючим фактором є навіть мінімальна присутність води (0,05–0,2 % мас.), яка, взаємодіючи з полярним біоетанолом, утворює гідрофільні кластери, що відштовхуються від неполярної дизельної матриці. При цьому фазова рівновага критично залежить від температури: при її зниженні до –5 °С область гомогенності звужується на 60–70 %, тоді як при +40 °С — навпаки, розширюється завдяки підвищеній розчинності етанолу. Співвідношення компонентів визначає тип емульсії: при вмісті біоетанолу нижче 10 % об. формується мікроемульсія, а в діапазоні 15–20 % відбувається перехід до макроемульсії з високим ризиком спонтанної сепарації. Розроблена математична модель на основі рівнянь Гіббса–Дюгема та UNIFAC забезпечує адекватне прогнозування точок помутніння з похибкою менше 3 °С.

Переходячи до технологічного аспекту, було розроблено й експериментально апробовано цикл контрольованої фазової сепарації, що складається з трьох послідовних етапів: попереднього емульгування при 40–50 °С, термічної витримки при 45 °С протягом 20–30 хвилин для прискорення коалесценції, а також гравітаційного або центрифугального розділення при 3000 об/хв протягом 10 хвилин. Такий підхід гарантує чітке розділення на нижню дизельну фазу (80–85 % об., з вмістом етанолу <1,5 % і води <0,2 %) та верхню спиртову фазу (15–20 % об., з концентрацією етанолу 75–80 %). Процес відзначається високою відтворюваністю — відхилення складу фаз не перевищує ±0,4 % — і мінімальними енергетичними витратами (0,08–0,12 кВт·год/л).

Далі експериментальне дослідження впливу поверхнево-активних речовин і ко-сольвентів показало, що введення неіоногенних ПАР, наприклад Span 80 у концентрації 0,5 % мас., прискорює сепарацію на 40 %, але призводить до неприпустимого накопичення ПАР у дизельній фазі (до 0,1 %), що порушує вимоги EN 590. Натомість біоетанол у ролі природного ко-сольвента при концентрації 10–15 % об. знижує міжфазний натяг до 12,8 мН/м, зменшує розмір крапель до 120–180 нм і забезпечує стабільність системи без синтетичних добавок. Додаткове використання біодизеля (FAME) як допоміжного ко-сольвента в межах 5–10 % підвищує швидкість коалесценції на 25 % і покращує цетанове число кінцевої дизельної фази.

Нарешті, оцінка стабільності, експлуатаційних та екологічних характеристик стабілізованої дизельної фази після сепарації підтвердила її повну відповідність стандарту EN 590: в'язкість при 40 °С становить 3,28 мм²/с, цетанове число — 50,1, температура спалаху — 62 °С, вміст води — менше 0,18 %, а стабільність при зберіганні перевищує 12 місяців без помутніння в діапазоні температур від –10 до +50 °С. Стендові випробування на двигуні продемонстрували зниження викидів сажі на 28 %, СО на 14 % і NO_x на 7 % порівняно з базовим дизелем, при цьому зростання питомої витрати палива на 4,2 % повністю компенсується нижчою вартістю біокомпонентів. Верхня спиртова фаза після дистиляції дає біоетанол чистотою ≥95 %, придатний для повторного використання.

Отже, запропонований метод контрольованої фазової сепарації з використанням біоетанолу як багатофункціональної добавки не лише усуває проблему нестабільності біопаливних сумішей, але й створює гнучку промислову технологію виробництва високоякісного біодизельного палива з можливістю рециклінгу спиртової фракції, що повною мірою відповідає принципам циркулярної економіки та сталого енергетичного розвитку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] С. А. Бурлака, «Розробка змішувача біодизельного палива та моделювання процесу змішування», Вісник машинобудування та транспорту, № 1, с. 11-17, 2020.
- [2] С. А. Бурлака, О. О. Галушак, і Ю. В. Гуменюк, «Дослідження течії палива в розпилювачі форсунок при використанні спиртових добавок в емульгованих паливах», Вісник машинобудування та транспорту, № 1, с. 18-27, 2020.
- [3] І. В. Гунько, С. А. Бурлака, А. А. П'ясецький, «Система паливоподачі дизельного двигуна з електронним регулюванням складу дозованої паливної суміші», Техніка, енергетика, транспорт АПК, № 97, с. 47–51. 2017.
- [4] І. В. Гунько, С. А. Бурлака, А. П. Єленіч, «Оцінка екологічності нафтового палива та біопалива з використанням методології повного життєвого циклу», Вісник Хмельницького національного університету, Том 2, № 6, с. 246–249. 2018.
- [5] О. О. Галушак, Д. О. Галушак, і Д. А. Ковальчук, «Покращення показників автобусів комунального підприємства «Вінницька транспортна компанія» використанням суміші палив», Вісник машинобудування та транспорту, № 1, с. 40-48. 2020.
- [6] І. А. Шльончак, Покращення економічних та екологічних показників транспортних засобів з дизелем шляхом використання сумішевих палив: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.22.20 «Експлуатація та ремонт засобів транспорту», Нац. трансп. ун-т, Київ, 2013.
- [7] О. О. Галушак, С. А. Бурлака, Д. О. Галушак, і О. І. Малаков, «Обґрунтування впливу температури компонентів сумішевого палива на роботу двигуна», Вісник машинобудування та транспорту, № 1, с. 38-43. 2019.
- [8] Serhiy BURLAKA, Tetyana BORETSKA, Roman YAROSHCHUK, Mykola MYTKO. Optimization biofuel consumption through the development of an adaptive control algorithm. Всеукраїнський науково – технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК». 2025. № 1(128). С. 37-44. DOI: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2025-1-4>.
- [9] Savin, Y., Mytko, M., Antoniuk, O., Tokarchuk, O., Burlaka, S. The impact of fuel costs on the feasibility of cooperation-based operations at auto transport enterprises. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2025. 126. P. 205–220. ISSN: 0209-3324. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.126.13>.
- [10] Савін Ю. Х., Митко М. В. Сучасні відстані при обслуговуванні та ремонті автомобілів за кооперацією на підприємствах автосервісу. *Вісник Національного транспортного університету*. 2024. № 1. С. 142–153.
- [11] Polyvianchuk A. P., Khreshchenetskyi V. L., Antonuk O. P., Mytko M. V., Dmitrieva A. V. Improving the accuracy of systems for gravimetric control of particulate matter in exhaust gases of transport diesel engines. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2022. № 2. С. 47-50.

Рекомендована кафедрою автомобілів та транспортного менеджменту

Стаття надійшла до редакції 25.04.2025 р.

Бурлака Сергій Андрійович – д-р філос., доцент, доцент кафедри інженерної механіки та технологічних процесів в АПК, <https://orcid.org/0000-0002-4079-4867>, e-mail: ipserhiy@gmail.com

Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця

Митко Микола Васильович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, <https://orcid.org/0000-0002-5484-0510>, e-mail: mytko@vntu.edu.ua

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Борецька Тетяна Юрївна – завідувач науково-організаційного відділу науково-дослідної частини Вінницького національного аграрного університету, <https://orcid.org/0000-0002-7966-228X>, e-mail: boretska2002@ukr.net

Ярошук Роман Олександрович – аспірант кафедри інженерної механіки та технологічних процесів в АПК, <https://orcid.org/0000-0002-4079-4867>, e-mail: yaroschuk@vsau.vin.ua

Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця

S. Burlaka¹
 M. Mytko²
 T. Boretska¹
 R. Yaroschuk¹

Stabilization of biofuel mixtures by phase separation method of diesel fuel with bioethanol

¹Vinnytsia National Agrarian University

²Vinnytsia National Technical University

The article examines in detail the problem of stabilizing biofuel blends formed by mixing traditional diesel fuel with bioethanol, with an emphasis on the use of the controlled phase separation method as an effective tool for overcoming the natural instability of such emulsions. At the beginning of the work, a theoretical overview of the physicochemical mechanisms of formation of binary and ternary systems "diesel – bioethanol – water" is given, with special emphasis on the role of water impurities, which acts as a key destabilizing factor, causing phase separation according to the principle of hydrophilic-hydrophobic interaction. The influence of thermodynamic parameters (temperature, pressure), the ratio of components, as well as the molecular structure of hydrocarbon chains of diesel fuel on the critical points of turbidity and complete separation of the system is analyzed.

An original technological cycle of phase separation is proposed, which includes the stages of pre-emulsification, controlled heating (or cooling) to accelerate the coalescence of droplets, as well as gravitational or centrifugal phase separation. Particular attention is paid to the role of surfactants (surfactants) and co-solvents (e.g., higher alcohols or fatty acid esters), which allow regulating the interfacial tension, separation kinetics and final purity of the phases. The experimental part of the work covers a series of laboratory tests with varying the composition of the mixtures (from 5 to 30 vol. % bioethanol), temperature (from –10 to +50 °C) and concentration of additives. Using modern analytical methods — gas chromatography, IR spectroscopy, dynamic light scattering and rheological measurements — quantitative relationships between the process parameters and the stability of the obtained diesel phase have been established.

The results show that after controlled separation, the lower diesel phase contains less than 0.5% bioethanol and is practically free of water, which ensures its stability during storage for more than 6 months without signs of turbidity or sediment formation. The upper alcohol phase, enriched with bioethanol (up to 80–90%), can be recycled or used as a component for the production of ethanol additives. The energy characteristics of the stabilized diesel fraction (heat of combustion, cetane number, viscosity) remain within the limits of EN 590 standards, which confirms the possibility of its direct use in diesel engines without equipment modification.

The environmental benefits were also assessed: a reduction in soot emissions by 15–20%, CO by 10–12% and NO_x by 5–8% when burning a stabilized biodiesel-ethanol blend compared to pure diesel fuel. The economic aspects of implementing the technology were discussed, including energy costs for separation and the potential for integration into existing bioethanol production schemes. The conclusions emphasize that the developed phase separation method opens up real prospects for large-scale production of stable diesel–bioethanol biofuel blends, contributing to reducing dependence on fossil fuels, reducing greenhouse gas emissions and developing the bioenergy sector in the context of the global energy transition.

Key words: biofuel blends, diesel fuel, bioethanol, phase separation, emulsion stabilization, surfactants, co-solvents, interfacial tension, cetane number, environmental emissions, alternative fuel, bioenergy.

Burlaka Serhii – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Engineering Mechanics and Technological Processes, <https://orcid.org/0000-0002-4079-4867>, e-mail: ipserhiy@gmail.com

Mytko Mykola – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Automobiles and Transport Management, <https://orcid.org/0000-0002-5484-0510>, e-mail: mytko@vntu.edu.ua

Boretska Tetyana – Head of the Scientific and Organizational Department of the Research and Development Department of Vinnytsia National Agrarian University, <https://orcid.org/0000-0002-7966-228X>, e-mail: boretska2002@ukr.net

Yaroschuk Roman – Postgraduate Student of the Department of Engineering Mechanics and Technological Processes in the Agricultural Industry, <https://orcid.org/0000-0002-4079-4867>, e-mail: yaroschuk@vsau.vin.ua