



Прийнято 22.04.2026. Прорецензовано 04.05.2026. Опубліковано 30.05.2026.

УДК 621.644.6:532.5:004.94

DOI: 10.31471/1993-9868-2026-1(45)-28-41

## СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ БЕНЗИНІВ З БІОЕТАНОЛОМ У ПАЛИВНІЙ ІНФРАСТРУКТУРІ УКРАЇНИ

**Дорошенко Ю. І. \***

Кандидат технічних наук, доцент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

76000, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-7196-9383>

**e-mail:** yuliia.doroshenko@nung.edu.ua

**Люта Н.В.**

Кандидат технічних наук, доцент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

76000, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-3321-0982>

**e-mail:** natalia.liuta@nung.edu.ua

**Анотація.** Зростаюче впровадження біоетанолу як кисневмісного компонента автомобільних бензинів є важливою складовою енергетичного переходу та гармонізації паливного ринку України з європейськими стандартами. Метою статті є проведення системного аналізу експлуатаційної надійності бензинів з біоетанолом у паливній інфраструктурі України з акцентом на процеси резервуарного зберігання та транспортування. Дослідження ґрунтуються на узагальненні нормативних вимог, аналізі фізико-хімічних властивостей бензоетанольних палив і оцінці експлуатаційних факторів, що впливають на стабільність палива в процесі обігу. Особливу увагу приділено гігроскопічності біоетанолу, механізмам накопичення води в резервуарах, фазовій стабільності системи «бензин–біоетанол–вода» та експлуатаційним наслідкам можливого фазового розшарування. Показано, що підвищений вміст вологи призводить до зниження якості палива, підвищення корозійної активності та ризику мікробіологічного забруднення елементів паливної інфраструктури. Обґрунтовано вплив біоетанолу на тиск насичених парів і леткість бензинів, що в умовах сезонних температурних коливань спричиняє зростання випаровувальних втрат і навантаження на дихальні системи резервуарів. Встановлено, що сукупна дія зазначених факторів формує системний ризик зниження експлуатаційної надійності паливної інфраструктури України, яка в багатьох випадках не повністю адаптована до використання бензоетанольних сумішей. На основі проведеного аналізу сформульовано практичні рекомендації щодо зниження експлуатаційних ризиків, зокрема посилення контролю вмісту води, оптимізації режимів зберігання, підвищення герметичності обладнання та доцільності застосування альтернативних кисневмісних компонентів, таких як ЕТВЕ. Отримані результати можуть бути використані фахівцями паливного сектору, операторами нафтобаз і АЗС та регуляторними органами для підвищення надійності обігу бензинів з біоетанолом в Україні.

**Ключові слова:** вуглеводнева основа; спиртовий компонент; фазова стабільність; гігроскопічність; втрати від випаровування; кисневмісні компоненти.

Запропоноване посилання: Дорошенко, Ю. І. & Люта, Н. В. (2026). Системний аналіз експлуатаційної надійності бензинів з біоетанолом у паливній інфраструктурі України. Нафтогазова енергетика, 1(45), 28-41. doi: 10.31471/1993-9868-2026-1(45)-28-41.

\* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



**Рисунок 1 – Схема виробництва біоетанолу та формування його експлуатаційно значущих властивостей у паливній інфраструктурі**

### Вступ

Використання біоетанолу як кисневмісного компонента автомобільних бензинів є одним із ключових напрямів декарбонізації транспортного сектору та збільшення частки відновлюваних джерел енергії у паливному балансі. У багатьох країнах світу біоетанол застосовують з метою підвищення октанового числа бензинів, зменшення викидів парникових газів і збільшення частки відновлюваних ресурсів у паливному балансі. В Україні впровадження бензинів з біоетанолом набуває особливої актуальності у зв'язку з адаптацією національного законодавства до європейських вимог та необхідністю підвищення енергетичної безпеки держави. Застосування біоетанолу в концентраціях від 5 до 10 % об'єму (E5–E10) розглядається як базовий напрям розвитку бензинів нового покоління.

Введення біоетанолу до складу бензинів змінює показники леткості, фазової стабільності та вологочутливості паливних сумішей, що безпосередньо впливає на умови їх зберігання і транспортування.

Накопичення води у бензоетанольних сумішах може призводити до втрати фазової стабільності системи «бензин–біоетанол–вода», що негативно позначається на стабільності пального, підвищує корозійні ризики та ускладнює забезпечення надійності резервуарного зберігання і транспортування палив [7–11].

Утворення водоетанольної фази супроводжується локальним зменшенням октанового числа вуглеводневої фази, підвищенням корозійної активності та зростанням ризику мікробіологічного забруднення резервуарів.

Додатковим чинником є вплив біоетанолу на тиск насичених парів і леткість пального, що у поєднанні з температурними коливаннями характерними для кліматичних умов України підвищує випаровувальні втрати та навантаження на дихальні системи резервуарів. Сукупна дія зазначених факторів формує системний ризик зниження експлуатаційної надійності паливної інфраструктури, який проявляється у прискореному зношенні обладнання, ускладненні контролю якості пального та підвищенні ймовірності експлуатаційних відмов.

Особливого значення зазначені процеси набувають в умовах України, де значна частина резервуарного парку, трубопровідних систем та обладнання АЗС тривалий час експлуатувалася переважно з традиційними вуглеводневими бензинами.

Наведена на рисунку 1 технологічна схема відображає інтегрований виробничо-логістичний ланцюг отримання паливного етанолу, у межах якого формуються фізико-хімічні характеристики продукту, що безпосередньо визначають умови його резервуарного зберігання та подальшого використання у складі моторних бензинів. Стадії зрідження, ферментації та

дистиляції є критичними з позицій формування водовмісту, леткості та стабільності етанолу, що зумовлює підвищені вимоги до герметичності апаратури та контролю технологічних параметрів.

Включення до схеми етапу резервуарного зберігання паливного етанолу дозволяє розглядати його не як проміжний продукт біотехнологічного циклу, а як повноцінний компонент паливно-енергетичної системи. Саме на цій стадії проявляються експлуатаційні ризики, пов'язані з гігроскопічністю етанолу, можливістю вторинного зволоження, зміною тиску насичених парів і потенційним впливом на матеріали резервуарів та запірно-регулювальної арматури.

Аналіз технологічної послідовності, поданої на рисунку, свідчить, що інтеграція виробництва паливного етанолу в існуючу паливну інфраструктуру потребує узгодження параметрів технологічного процесу з вимогами до резервуарних парків, систем транспортування та контролю якості моторних палив. Наявність побічних потоків і операцій із їх оброблення не впливає безпосередньо на паливні характеристики етанолу, однак визначає загальну енергоемність процесу та додаткові експлуатаційні навантаження на об'єкти інфраструктури.

Таким чином, представлений рисунок технічно обґрунтовує необхідність розгляду виробництва паливного етанолу як елемента єдиного інженерного ланцюга «виробництво – зберігання – постачання», у межах якого порушення технологічних режимів на будь-якій стадії може призводити до зниження експлуатаційної надійності паливних систем і підвищення інфраструктурних ризиків.

Як показано на рисунку 1, визначальним фактором зниження експлуатаційної надійності бензинів з біоетанолом є його гігроскопічність, яка сприяє накопиченню води в паливі під час зберігання та транспортування. Подальше зростання вмісту води призводить до зниження фазової стабільності суміші «бензин–біоетанол–вода», утворення водоетанольної фази та підвищення корозійної і мікробіологічної активності в елементах паливної інфраструктури.

Разом із позитивними екологічними та енергетичними ефектами використання біоетанолу супроводжується низкою специфічних експлуатаційних проблем, пов'язаних зі зберіганням, транспортуванням і надійністю функціонування паливної інфраструктури. Біоетанол є гігроскопічним компонентом, здатним активно поглинати воду з навколишнього се-

редовища, що може призводити до накопичення води в резервуарах і трубопровідних системах. У таких умовах формуються передумови для фазового розшарування системи «бензин–біоетанол–вода», що негативно впливає на якість пального, підвищує корозійні ризики та знижує експлуатаційну надійність паливної інфраструктури. Ці процеси є особливо актуальними для України, де значна частина резервуарного парку та систем транспортування були запроектовані для роботи з традиційними бензинами і не завжди адаптована до властивостей бензоетанольних сумішей.

Фізико-хімічні властивості бензинів з біоетанолом істотно відрізняються від характеристик традиційних бензинів. Додавання етанолу змінює леткість палива, спричиняючи зростання тиску насичених парів (Reid Vapor Pressure, RVP) та збільшення випаровувальних втрат у процесі зберігання. Підвищена леткість у поєднанні з гігроскопічністю біоетанолу також впливає на фазову стабільність сумішей, зумовлюючи ризики утворення двофазних систем при наявності навіть незначних кількостей води. У зарубіжних дослідженнях показано, що вплив біоетанолу на фазову стабільність і випаровувальні характеристики бензинів істотно залежить від його концентрації, температурного режиму та умов зберігання [15].

В українських наукових публікаціях значна увага приділяється адаптації нормативної бази та контролю якості бензинів з біоетанолом. Дослідження вітчизняних авторів зосереджені на порівнянні властивостей бензоетанольних сумішей із вимогами ДСТУ та стандартів EN, а також на аналізі експлуатаційних ризиків, пов'язаних зі зберіганням і транспортуванням палива. Разом із тим зазначається, що несприятливі кліматичні умови, обмежені можливості контролю вмісту води та технічний стан резервуарного парку можуть посилювати негативні ефекти, характерні для бензоетанольних систем. Окремі роботи також розглядають альтернативні кисневмісні компоненти, зокрема етил-трет-бутиловий ефір (ETBE), з позицій фазової стабільності та сумісності з існуючим обладнанням.

Попри наявність значного масиву зарубіжних і вітчизняних досліджень, більшість із них зосереджена на окремих фізико-хімічних або технологічних аспектах бензинів з біоетанолом, тоді як комплексна оцінка експлуатаційної надійності в умовах реальної паливної інфраструктури залишається недостатньо опрацьованою. Зокрема, обмежено вивченими є взаємозв'язки між гігроскопічністю біоета-

нолу, накопиченням води в резервуарах, сезонними кліматичними чинниками та практичними режимами зберігання і транспортування палива в українських АЗС і нафтобазах. Недостатньо систематизованими залишаються також питання узгодження нормативних вимог із реальними експлуатаційними умовами.

Актуальною є потреба у застосуванні системного підходу до оцінки експлуатаційної надійності бензинів з біоетанолом, який поєднує аналіз фізико-хімічних властивостей палива, вплив гігроскопічності, фазової стабільності та випаровувальних втрат з урахуванням технічного стану обладнання, кліматичних умов і нормативних обмежень. Такий підхід дозволяє сформулювати науково обґрунтовані рекомендації для підвищення стабільності та безпеки зберігання і транспортування бензинів з біоетанолом.

У зв'язку з цим метою даної статті є проведення комплексного аналізу експлуатаційної надійності бензинів з біоетанолом в умовах паливної інфраструктури України з урахуванням фізико-хімічних властивостей палива, кліматичних чинників, технічного стану обладнання та вимог чинних стандартів.

**Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:** аналіз впливу біоетанолу на легкість, тиск насичених парів, гігроскопічність і фазову стабільність бензинів; оцінка ролі експлуатаційних і кліматичних факторів; порівняння біоетанолу з альтернативними кисневмісними компонентами; обґрунтування практичних рекомендацій для операторів АЗС і нафтобаз.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у проведенні вперше системного аналізу чинників експлуатаційної надійності бензоетанольних сумішей у межах поточної паливної інфраструктури України, що дало змогу ідентифікувати критичні вузли ризику розшарування палива під час тривалого зберігання. Подальшого розвитку дістало наукове обґрунтування застосування етил-трет-бутилового етеру (ЕТВЕ) як високоефективного кисневмісного компонента, що, на відміну від прямого введення етанолу, забезпечує вищу фазову стабільність паливної системи за умов змінного температурного режиму. Крім того, удосконалено методологічний підхід до оцінки гігроскопічності біопалив шляхом інтеграції вимог оновлених стандартів EN 228 та EN 590 із фізико-хімічними закономірностями процесів накопичення вологи в резервуарах типу РВС.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробці рекомендацій щодо ада-

птації технологічних процесів зберігання та транспортування палив в умовах паливної інфраструктури України для запобігання фазовому розшаруванню бензоетанольних сумішей. Отримані дані щодо переваг використання ЕТВЕ та врахування оновлених вимог стандартів EN 228 та EN 590 можуть бути використані підприємствами нафтопродуктозабезпечення для підвищення експлуатаційної надійності паливних систем, мінімізації втрат від обводнення нафтопродуктів у резервуарах типу РВС, а також при підготовці нормативно-технічної документації для гармонізації вітчизняного паливного ринку з нормами Європейського Союзу.

### **Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій**

Використання біоетанолу як кисневмісного компонента автомобільних бензинів розглядається у світовій практиці як один із інструментів декарбонізації транспортного сектору та підвищення частки відновлюваних джерел енергії. Нормативні засади впровадження біокомпонентів у моторні палива в країнах Європейського Союзу визначені директивами ЄС, які регламентують вимоги до якості бензинів і дизельного палива, а також зобов'язують держави-члени збільшувати частку відновлюваної енергії у транспорті [1–3]. Технічні вимоги до автомобільних бензинів регламентуються стандартом EN 228:2024, який допускає використання біоетанолу в концентраціях до 10 % об'єму та встановлює методи контролю якості палив [4]. Паралельно діють стандарти EN 590 для дизельного пального, що підкреслює комплексний підхід до регулювання ринку моторних палив [5]. В Україні правові засади застосування альтернативних палив визначені Законом України «Про альтернативні види палива», який створює умови для впровадження бензинів з біоетанолом у національну паливну інфраструктуру [6].

Значний масив закордонних досліджень присвячений впливу біоетанолу на фізико-хімічні властивості бензинів. У роботах показано, що додавання етанолу змінює легкість пального та тиск насичених парів, що може призводити до зростання випаровувальних втрат під час зберігання [7]. Експериментальні дослідження фазової поведінки системи «бензин–біоетанол–вода» підтверджують, що гігроскопічність етанолу зумовлює накопичення води в паливі та підвищує ризик фазового розшарування за певних температурних умов [8, 10]. Такі процеси мають істотне значення для

експлуатаційної надійності резервуарного зберігання бензинів з біоетанолом.

Для більш глибокого аналізу фазової стабільності бензоетанольних сумішей застосовуються термодинамічні моделі фазової рівноваги. У роботах [9, 12] показано, що використання рівнянь стану та моделей активності дає можливість прогнозувати умови утворення двофазних систем і оцінювати вплив складу пального та температурного режиму на його стабільність. Такі підходи є важливими для обґрунтування допустимих умов зберігання і транспортування бензинів з біоетанолом.

Окрему групу досліджень становлять роботи, присвячені стабільності бензоетанольних сумішей у процесі тривалого зберігання. Показано, що температурні коливання та сезонні фактори можуть суттєво впливати на втрати пального від випаровування та на фазову стабільність сумішей, особливо за підвищеного вмісту етанолу [11]. Аналогічні висновки отримано в дослідженнях випаровуваності бензинових фракцій після компаундування з оксигенатами, де зафіксовано зміну тиску насичених парів за температури 37,8 °C залежно від типу та концентрації добавок [15].

Поряд із біоетанолом у наукових дослідженнях розглядається етил-трет-бутиловий ефір (ЕТВЕ) як альтернативний кисневмісний компонент бензинів. Показано, що ЕТВЕ характеризується меншою гігроскопічністю та кращою сумісністю з вуглеводневою матрицею пального, що знижує ризики фазового розшарування і негативного впливу на стабільність бензину під час зберігання [14]. Це робить ЕТВЕ перспективним компонентом для використання в умовах існуючої паливної інфраструктури.

Аналіз фізико-хімічних та експлуатаційних характеристик ЕТВЕ як кисневмісного компонента бензинів свідчить про його високу ефективність у забезпеченні стабільності паливних сумішей та оптимізації їх леткості [13]. Вітчизняні дослідження також підтверджують, що розчинність етилового спирту в бензині суттєво залежить від складу вуглеводневої основи та температурних умов, що має практичне значення для запобігання фазовому розшаруванню під час зберігання, що узгоджується з класичними результатами [15] та сучасними дослідженнями [8, 10].

Таким чином, аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень показує, що властивості бензинів з біоетанолом достатньо добре вивчені з позицій фізико-хімічних та моторних характеристик. Водночас питання експлуатаційної надійності, зокрема у частині резервуарного зберігання, фазової стабільності та випаровувальних втрат у реальних умовах паливної інфраструктури України, потребують подальшого системного аналізу з урахуванням нормативних вимог і практичних умов експлуатації.

### Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Незважаючи на значну кількість досліджень фізико-хімічних властивостей бензинів з біоетанолом, питання інтегрованого оцінювання їх експлуатаційної надійності з урахуванням стану паливної інфраструктури, кліматичних умов та режимів зберігання залишаються недостатньо дослідженими. Більшість наявних робіт зосереджена на дослідженні окремих фізико-хімічних властивостей бензоетанольних сумішей у лабораторних або контрольованих умовах, тоді як комплексна оцінка їх поведінки в реальних експлуатаційних умовах залишається недостатньо опрацьованою.

Однією з ключових прогалин є обмежене врахування взаємозв'язку між гігроскопічністю біоетанолу, накопиченням води в резервуарному обладнанні та практичними режимами зберігання і транспортування палива. У більшості досліджень ці фактори розглядаються ізольовано, без урахування особливостей експлуатації резервуарного парку, що функціонує в умовах змінної температури, вологості та різного технічного стану обладнання, характерних для українських нафтобаз і АЗС.

Недостатньо дослідженим залишається вплив тривалості зберігання бензоетанольних сумішей у поєднанні з сезонними кліматичними чинниками. Коливання температури, підвищена вологість повітря та ризик конденсації води в резервуарах можуть істотно впливати на фазову стабільність і леткість палива, однак ці аспекти переважно розглядаються фрагментарно або на основі узагальнених моделей, що не враховують локальні умови експлуатації паливної інфраструктури.

Ще одним невирішеним питанням є системна оцінка доцільності використання альтернативних кисневмісних компонентів, зокрема етил-трет-бутилового ефіру (ЕТВЕ), у порівнянні з біоетанолом. Хоча окремі дослідження свідчать про кращу фазову стабільність і меншу гігроскопічність ЕТВЕ, бракує комплексних аналізів, які б поєднували фізико-хімічні характеристики палива з експлуатаційними умовами зберігання, транспортування та сумі-

сності з існуючим обладнанням у межах національної паливної мережі.

Окрему проблему становить узгодження нормативних вимог із реальними умовами експлуатації. Стандарти EN 228, ASTM D323 та відповідні ДСТУ регламентують допустимі параметри бензинів з біоетанолом, однак відсутність системного аналізу взаємодії цих вимог з фактичним технічним станом резервуарного парку, можливостями контролю вмісту води та логістичними особливостями обігу палива ускладнює формування практичних рекомендацій для операторів паливної інфраструктури.

Таким чином, наявні наукові дані не забезпечують цілісного уявлення про експлуатаційну надійність бензинів з біоетанолом у межах паливної інфраструктури України. Це обумовлює необхідність застосування системного підходу, який дозволяє інтегрувати фізико-хімічні властивості палива, кліматичні та експлуатаційні чинники, технічний стан обладнання та нормативні обмеження з метою комплексної оцінки ризиків і підвищення надійності зберігання та транспортування бензоетанольних палив.

#### **Мета та завдання досліджень**

Метою дослідження є проведення системного аналізу експлуатаційної надійності бензинів з біоетанолом в умовах паливної інфраструктури України з урахуванням фізико-хімічних властивостей палива, специфіки його зберігання і транспортування, кліматичних чинників та вимог чинної нормативної бази з метою обґрунтування напрямів підвищення стабільності та безпеки обігу бензоетанольних палив.

Відповідно до мети сформуємо задачу досліджень: проаналізувати вплив додавання біоетанолу на фізико-хімічні властивості бензинів, зокрема леткість, тиск насичених парів, гігроскопічність і фазову стабільність; оцінити роль експлуатаційних та кліматичних факторів у формуванні ризиків втрати стабільності бензоетанольних сумішей під час зберігання і транспортування; узагальнити особливості взаємодії системи «бензин–біоетанол–вода» в умовах резервуарного зберігання; здійснити порівняльний аналіз біоетанолу та альтернативних кисневмісних компонентів з позицій експлуатаційної стабільності та сумісності з існуючою паливною інфраструктурою; проаналізувати відповідність нормативних вимог до якості бензинів з біоетанолом реальним умовам експлуатації паливної інфраструктури;

сформулювати практичні рекомендації щодо зниження експлуатаційних ризиків та підвищення надійності зберігання і транспортування бензинів з біоетанолом.

Реалізація зазначених завдань дозволяє сформулювати цілісне уявлення про фактори, що визначають експлуатаційну надійність бензинів з біоетанолом, та забезпечити прикладну спрямованість отриманих висновків для операторів нафтобаз, АЗС і фахівців паливного сектору України.

Методологічною основою дослідження є системний аналіз, порівняльний аналіз фізико-хімічних властивостей палив, узагальнення нормативних вимог та логічне моделювання експлуатаційних ризиків у межах паливної інфраструктури.

#### **Висвітлення основного матеріалу дослідження**

Останні десятиліття характеризуються посиленням уваги до забруднення довкілля та зміни клімату, що зумовило пріоритетність політики сталого розвитку, зокрема в країнах Європейського Союзу. Важливою складовою цієї політики є декарбонізація транспортного сектору та запровадження відновлюваних компонентів у моторних паливах. Викиди транспорту становлять помітну частку загальних викидів парникових газів, тому скорочення вуглецевого сліду палива протягом усього життєвого циклу розглядається як один із дієвих механізмів досягнення кліматичних цілей. З цією метою в ЄС сформовано директивне та стандартне регулювання, спрямоване на підвищення частки відновлюваної енергії в транспорті та встановлення вимог до якості моторних палив [1–3]. Технічні вимоги до бензинів та дизельних палив регламентуються європейськими стандартами EN 228 і EN 590, які визначають допустимі межі введення відновлюваних компонентів та методи контролю їхніх показників якості [4, 5].

Дослідження механізмів впливу різних чинників на стабільність палива потребує врахування їхньої ієрархічної взаємодії. Загальна логіко-структурна схема цих взаємозв'язків, що описує перехід від впливу зовнішнього середовища до показників надійності, представлена на рисунку 2.

Аналіз представленої схеми (рисунк 2) дозволяє простежити причинно-наслідковий ланцюг формування показників надійності. Встановлено, що параметри зовнішнього середовища, такі як коливання температури та вологість повітря, ініціюють зміну технічного

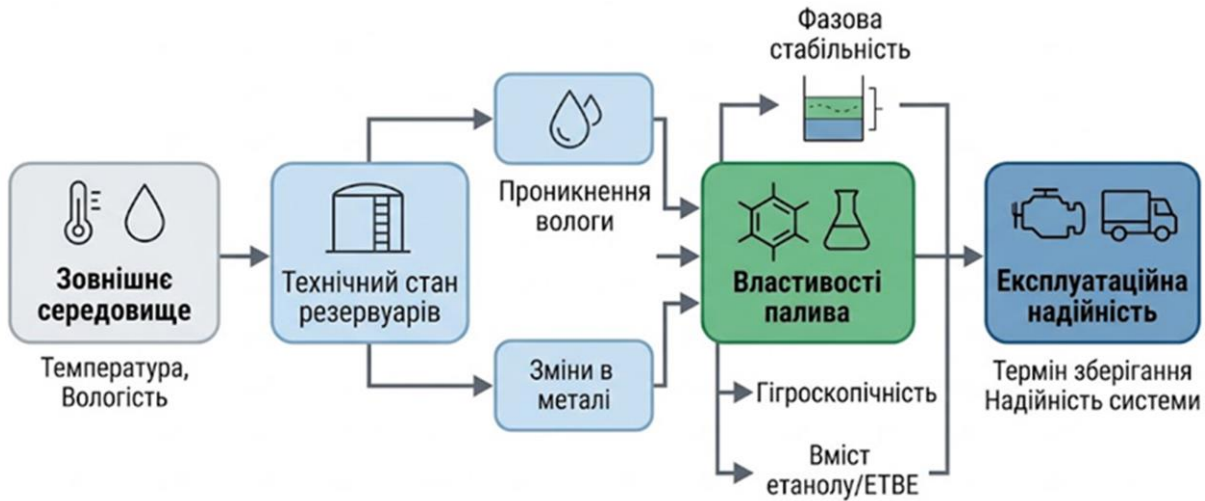


Рисунок 2 – Схема взаємозв’язків чинників впливу на експлуатаційну надійність бензоетанольних сумішей

стану резервуарного парку (зокрема, через процеси дихання резервуарів та корозійні зміни металу). Це, у свою чергу, безпосередньо корелює з інтенсивністю проникнення вологи в паливну систему. Оцінка властивостей палива через призму гігроскопічності та концентрації кисневмісних компонентів (етанолу або ЕТВЕ) дозволяє визначити межу фазової стабільності. Кінцевим результатом такої системної взаємодії є рівень експлуатаційної надійності, що виражається у термінах безвідмовного зберігання та збереження фізико-хімічних показників палива згідно з вимогами EN 228.

Український паливний ринок також перейшов до нормативного закріплення вимог щодо біокомпонентів. Законодавчо визначено запровадження обов’язкового додавання біоетанолу до бензинів у мінімальній частці 5% (з винятком бензинів із октановим числом 98 і вище), а також встановлено відповідальність за реалізацію бензину без біокомпонентів на АЗС [6]. Такі зміни обґрунтовуються міжнародними зобов’язаннями України щодо збільшення частки відновлюваної енергії в транспорті й інтеграції до європейського енергетичного простору.

Для бензинових двигунів із іскровим запалюванням найбільш поширеними біокомпонентами є етанол (EtOH) та етил-трет-бутиловий етер (ЕТВЕ). Етанол є повністю відновлюваним, тоді як ЕТВЕ частково відновлюваний (за рахунок біоетанольної складової), однак обидва компоненти застосовуються як оксигенати, що підвищують октанове число та можуть сприяти зменшенню токсичності вихлопних газів у порівнянні з традиційними ву-

гледневими бензинами або бензинами з МТВЕ.

Біоетанол, отриманий шляхом ферментативного зброджування біомаси, найчастіше використовується у концентраціях Е5–Е10. Його важливими властивостями є високе октанове число (RON близько 108), полярність, висока розчинність у воді та виражена гігроскопічність. Саме ці характеристики визначають як позитивні ефекти (покращення антидетонаційної стійкості, потенційне зниження викидів CO та HC), так і експлуатаційні виклики (ризик фазового розшарування, чутливість до вологи, вплив на матеріали паливної системи).

Регуляторно-стандартний контекст також є визначальним: у EN 228:2012 допустимий масовий вміст кисню підвищено до 3,7%, що дозволяє додавати до 10% об’ємних етанолу та до 22% об’ємних етерів із  $\geq 5$  атомами вуглецю (зокрема ЕТВЕ), тоді як EN 228:2008 встановлював нижчі межі для кисню та, відповідно, менші допустимі частки оксигенатів. Це відображає європейський тренд на розширення застосування біокомпонентів при збереженні керованості експлуатаційних властивостей палива [4].

ЕТВЕ є кисневмісним етером з температурою кипіння близько 72–73 °C, низькою розчинністю у воді та доброю сумісністю з вуглеводневою матрицею бензину. На відміну від етанолу, ЕТВЕ характеризується значно нижчою гігроскопічністю, що зменшує ймовірність накопичення води та фазового розшарування. Крім того, вплив ЕТВЕ на тиск насичених парів зазвичай менш критичний, ніж у випадку етанолу, що має значення для втрат від випаровування під час зберігання та

**Таблиця 1 – Порівняння впливу додавання біоетанолу на властивості бензину з точки зору його зберігання**

Властивість	Бензин без біоетанолу	Бензин з біоетанолом (Е5–Е10)	Вплив на зберігання
Гігроскопічність	Низька	Висока, поглинає воду з повітря	Можливе утворення водної фази, корозія резервуарів
Хімічна стабільність	Висока при правильному зберіганні	Знижується через каталіз окислення спиртом	Осад, смоли, темніння палива при тривалому зберіганні
Паровий тиск / леткість	Стандартний	Зростає через присутність етанолу	Вища втрата палива через випаровування, потреба в герметичних ємностях
Взаємодія з матеріалами	Мінімальна	Може руйнувати гуму, пластик, епоксидне покриття	Потребує стійких резервуарів і ущільнювачів
Октанове число	Залежить від базового складу	Підвищується	Може змінюватися при тривалому зберіганні, впливає на ефективність палива
Мікробіологічна активність	Мінімальна	Підвищена через наявність води і етанолу	Ризик утворення біоплівки, осаду, бактеріального забруднення

транспортування. Перспективним також є поєднане застосування етанолу та ЕТВЕ: воно може забезпечувати компроміс між високими антидетонаційними властивостями і зниженням надмірної леткості, характерної для етанольних сумішей.

З точки зору зберігання, визначальним чинником для бензинів з біоетанолом є гігроскопічність етанолу та пов'язані з нею процеси накопичення води. Потрапляння вологи в резервуар (конденсація, порушення герметичності, технологічні операції) може поступово збільшувати водовміст палива. За перевищення граничної розчинності води виникає фазове розшарування системи «бензин–біоетанол–вода» з утворенням водоетанольної фази, що змінює склад бензинової фази та погіршує експлуатаційні характеристики.

Окрім фазової нестабільності, додавання етанолу впливає на леткість і тиск насичених парів, що може збільшувати випаровувальні втрати та чутливість до температурних коливань. Також важливими є матеріальна сумісність (потенційний вплив на гумові та полімерні елементи ущільнень і покриттів) і мікробіологічні ризики, що посилюються при наявності водної фази.

Узагальнені відмінності між бензином без біоетанолу та бензином типу Е5–Е10 з позицій зберігання наведено у таблиці 1.

Аналіз даних, наведених у таблиці 1, свідчить, що додавання біоетанолу суттєво змінює експлуатаційні властивості бензину з позицій

резервуарного зберігання. Визначальним фактором є різке зростання гігроскопічності палива, що зумовлює накопичення води та підвищує ризик утворення водоетанольної фази. Це, у свою чергу, спричиняє локальне зниження октанового числа бензинової фази, посилення корозійних процесів і мікробіологічної активності в резервуарах. Підвищення тиску насичених парів та леткості бензинів Е5–Е10 додатково збільшує випаровувальні втрати, особливо за умов сезонних температурних коливань, характерних для клімату України. Таким чином, зберігання бензинів з біоетанолом потребує більш жорсткого контролю водовмісту, герметичності резервуарів і матеріальної сумісності обладнання.

Отже, для резервуарного зберігання бензинів з біоетанолом критично важливими є: контроль водовмісту та конденсату, забезпечення герметичності резервуарів, застосування матеріалів, стійких до спиртів, і періодичний лабораторний контроль показників якості.

Під час транспортування (цистернами або трубопроводами) ризики, властиві етанольним сумішам, посилюються через зміну температури, вібраційні навантаження, можливі підсоси вологи та контакт з різними матеріалами. Висока гігроскопічність сприяє поглинанню води з конденсату, а зростання тиску парів збільшує небезпеку втрат від випаровування та вимоги до справності запірно-дихальної арматури. Додатково зростає значущість матеріальної

**Таблиця 2 – Порівняння впливу додавання біоетанолу на властивості бензину з точки зору його транспортування**

Властивість	Бензин без біоетанолу	Бензин з біоетанолом (E5–E10)	Вплив на транспортування
Гігроскопічність	Низька	Висока, поглинає воду з повітря	Можливе утворення двофазних сумішей, корозія трубопроводів
Паровий тиск / леткість	Стандартний	Зростає через присутність етанолу	Підвищений тиск у цистернах, потреба в контролі клапанів і герметичності
Взаємодія з матеріалами	Мінімальна	Може руйнувати гуму, пластик, полімерні покриття	Необхідність використання стійких до спиртів матеріалів
Мікробіологічна активність	Мінімальна	Підвищена через наявність води і етанолу	Ризик утворення осаду, біоплівки, забруднення трубопроводів
Однорідність суміші	Стабільна	Може утворювати водну фазу	Потреба контролю температури і вологості під час транспортування

сумісності прокладок, полімерних покриттів і ущільнень.

Порівняльні аспекти транспортування бензину без етанолу та E5–E10 узагальнено у таблиці 2.

Порівняльний аналіз, узагальнений у таблиці 2, показує, що під час транспортування бензинів з біоетанолом експлуатаційні ризики посилюються порівняно зі стадією стаціонарного зберігання. Зміна температурного режиму, динамічні навантаження та можливий контакт палива з вологою сприяють поглинанню води та зростанню ймовірності фазового розшарування. Підвищений тиск насичених парів у бензинах E5–E10 збільшує навантаження на запірно-дихальну арматуру та підвищує ризик втрат палива від випаровування. Крім того, агресивні властивості етанолу щодо гумових і полімерних матеріалів зумовлюють необхідність застосування спеціальних ущільнювачів і покриттів. Отже, транспортування бензинів з біоетанолом потребує підвищених вимог до герметичності, матеріальної сумісності та контролю експлуатаційних параметрів.

Таким чином, транспортування бензинів з біоетанолом потребує підвищеного контролю герметичності, мінімізації контакту з вологою, належного стану арматури та застосування матеріалів, сумісних зі спиртовмісним паливом.

Порівняно з етанолом, ETBE демонструє більш сприятливі характеристики з погляду інфраструктурної надійності: низька гігроскопічність і слабка взаємодія з водою знижують ймовірність утворення водної фази.

Хімічна стабільність ETBE у складі бензину сприяє кращому збереженню однорідності та властивостей під час тривалого зберігання. Вплив на тиск парів зазвичай помірніший, що зменшує втрати від випаровування.

На підставі узагальнення результатів, наведених у таблицях 1 і 2, встановлено, що використання біоетанолу як кисневмісного компонента бензинів істотно підвищує експлуатаційні ризики на етапах зберігання та транспортування. Ключовими чинниками є гігроскопічність етанолу, схильність до фазового розшарування за наявності води та зростання випаровувальних втрат, що вимагає посиленого контролю водовмісту, температурних режимів і герметичності паливної інфраструктури.

Аналіз даних таблиць 1 і 2 підтверджує, що за умов кліматичних коливань, характерних для України, традиційна інфраструктура зберігання і транспортування моторних бензинів є недостатньо адаптованою до широкого впровадження етанольних палив без попередньої технічної модернізації резервуарного парку, ущільнювальних матеріалів та систем контролю якості палива.

Узагальнені переваги ETBE під час зберігання наведено в таблиці 3, а під час транспортування — у таблиці 4.

Дані таблиці 3 підтверджують, що застосування ETBE як кисневмісного компонента характеризується більш сприятливими умовами резервуарного зберігання порівняно з біоетанолом. Низька гігроскопічність ETBE практично усуває ризик накопичення води та утворення водної фази, що істотно знижує ко-

**Таблиця 3 – Порівняння впливу додавання ЕТВЕ на властивості бензину з точки зору його зберігання**

Властивість	Бензин без ЕТВЕ	Бензин з ЕТВЕ	Вплив на зберігання
Гігроскопічність	Низька	Дуже низька	Мінімальний ризик утворення водної фази та корозії
Хімічна стабільність	Середня	Висока	Зменшення утворення осаду та смол при тривалому зберіганні
Паровий тиск / леткість	Стандартний	Легке підвищення	Менші втрати палива через випаровування порівняно з етанолом
Взаємодія з матеріалами	Мінімальна	Стабільна	Не пошкоджує ущільнювачі та пластик, безпечніше для резервуарів
Мікробіологічна активність	Мінімальна	Дуже низька	Обмежене утворення осаду та біоплівки
Октанове число	Залежить від складу	Підвищене та стабільне	Забезпечує ефективність палива при тривалому зберіганні

**Таблиця 3 – Порівняння впливу додавання ЕТВЕ на властивості бензину з точки зору його зберігання**

Властивість	Бензин без ЕТВЕ	Бензин з ЕТВЕ	Вплив на транспортування
Гігроскопічність	Низька	Дуже низька	Мінімальний ризик утворення двофазної суміші та корозії
Паровий тиск / леткість	Стандартний	Легке підвищення	Зменшені втрати палива, контроль герметичності простіший
Взаємодія з матеріалами	Мінімальна	Стабільна	Не пошкоджує ущільнювачі та пластик
Мікробіологічна активність	Мінімальна	Дуже низька	Обмежене утворення осаду та біоплівки
Однорідність суміші	Стабільна	Стабільна	Підтримується на високому рівні під час транспортування

розійну й мікробіологічну активність у резервуарах. Вища хімічна стабільність бензинів з ЕТВЕ сприяє зменшенню утворення осаду та збереженню октанового числа протягом тривалого зберігання. Помірний вплив ЕТВЕ на тиск насичених парів знижує випаровувальні втрати, що є важливим чинником для експлуатаційної надійності паливної інфраструктури. Таким чином, використання ЕТВЕ дозволяє зменшити вимоги до адаптації резервуарного парку та підвищити стабільність палива в процесі зберігання.

Як випливає з результатів, наведених у таблиці 4, бензини з ЕТВЕ демонструють підвищену стабільність під час транспортування порівняно з етанольними сумішами. Мінімальна гігроскопічність ЕТВЕ знижує ймовірність утворення двофазних систем і корозійного впливу на трубопроводи та ємності. Стабільність однорідності суміші та помірний рівень леткості сприяють зменшенню втрат палива й спрощують контроль герметичності транспортних систем. Відсутність агресивного впливу на матеріали ущільнень і покриттів до-

датково підвищує інфраструктурну сумісність таких палив. Отже, застосування ЕТВЕ або його комбінацій з біоетанолом може розглядатися як ефективний інженерний підхід до зниження експлуатаційних ризиків під час транспортування бензинів, насамперед через меншу чутливість до вологи та кращу стабільність під час зберігання і транспортування.

Результати, узагальнені в таблицях 3 і 4, свідчать, що застосування ЕТВЕ як альтернативного або комбінованого кисневмісного компонента забезпечує значно вищу стабільність палив під час зберігання і транспортування. Низька гігроскопічність ЕТВЕ практично усуває ризик утворення водної фази, знижує корозійну активність і мінімізує втрати палива від випаровування.

Порівняльний аналіз експлуатаційних характеристик бензинів з біоетанолом та ЕТВЕ (таблиці 1–4) дозволяє зробити висновок, що використання ЕТВЕ суттєво зменшує інженерні та експлуатаційні ризики без необхідності масштабної реконструкції наявної паливної інфраструктури, що має принципове значення



**Рисунок 3 – Графік залежності максимальної вологоємності від вмісту кисневмісних компонентів та межі фазової стабільності згідно з EN 228**

для умов енергетичного переходу та обмежених інвестиційних ресурсів.

Інфраструктурна надійність обігу бензинів з біоетанолом визначається системною взаємодією «паливо – резервуар/логістика – зовнішні умови». Для етанольних бензинів ключовими механізмами зниження надійності є: накопичення води → фазове розширення → погіршення якості палива та зростання корозійних і мікробіологічних ризиків; а також підвищена леткість → збільшення тиску парів → випарувальні втрати та вимоги до герметичності. Для палив з ЕТВЕ ці ризики загалом нижчі за рахунок меншої гігроскопічності та вищої стабільності сумішей.

Отримані результати обґрунтовують доцільність диференційованого підходу до впровадження кисневмісних компонентів у моторні бензини, за якого вибір між біоетанолом, ЕТВЕ або їх комбінаціями повинен здійснюватися з урахуванням технічного стану інфраструктури, кліматичних умов експлуатації та вимог до надійності паливних систем.

Враховуючи нормативні вимоги та практичні умови експлуатації в Україні, забезпечення надійності обігу бензинів з біоетанолом потребує: системного контролю водовмісту, технічної придатності резервуарного парку й арматури, використання сумісних матеріалів, а також диференційованого підходу до режимів зберігання і транспортування з урахуванням сезонних температурних коливань.

### Висновки

Проведене дослідження дозволило комплексно оцінити вплив кисневмісних компонентів на експлуатаційні властивості моторних бензинів у межах паливної інфраструктури України. На основі розробленої схеми системних взаємозв'язків (рисунок 2) встановлено, що введення біоетанолу істотно змінює фізико-хімічну поведінку паливних сумішей, зокрема підвищує їх гігроскопічність і чутливість до дії вологи, що створює передумови для фазового розширення та деградації якісних показників палива під час зберігання і транспортування.

Аналіз свідчить, що за умов сезонних температурних коливань і підвищеної вологості, характерних для клімату України, експлуатація бензинів з біоетанолом супроводжується зростанням інженерних ризиків, пов'язаних із корозійною активністю, мікробіологічними процесами та випарувальними втратами. Це свідчить про обмежену готовність наявної паливної інфраструктури до широкомасштабного використання етанольних бензинів без цілеспрямованої технічної адаптації резервуарного парку, трубопровідних систем і матеріалів ущільнень та впровадження систем моніторингу вологи.

Для візуалізації фізико-хімічних умов втрати гомогенності сумішей та порівняння стабілізуючого ефекту різних кисневмісних компонентів нами побудовано графік фазової стабільності (рисунок 3).

Аналіз представлених залежностей (рисунок 3) демонструє суттєву різницю у фазовій стабільності паливних систем залежно від типу оксигенату. Встановлено, що для бензоетанольних сумішей крива граничної вологоємності (синя лінія) стрімко зростає, проте вона знаходиться у зоні високого ризику порушення стандарту EN 228. Зокрема, за вмісту біоетанолу понад 5 % об. суміш здатна утримувати кількість води, що перевищує нормативний ліміт 0,15 % мас., ще до моменту візуального розшарування.

Натомість використання ЕТВЕ (пунктирна лінія) кардинально змінює ситуацію: через низьку гігроскопічність ЕТВЕ зона однорідної фази залишається стабільною і знаходиться значно нижче критичної межі обводнення. Це візуально підтверджує, що заміна етанолу на ЕТВЕ дозволяє забезпечити експлуатаційну надійність паливної системи без ризику фазового розпаду суміші при накопиченні конденсату в резервуарах.

Порівняльний аналіз засвідчив, що застосування ЕТВЕ як кисневмісного компонента забезпечує вищу стабільність моторних бензинів у процесах зберігання та транспортування. Низька гігроскопічність ЕТВЕ суттєво зменшує ймовірність утворення водної фази та пов'язаних із нею корозійних явищ, а також сприяє збереженню однорідності паливних сумішей у повній відповідності до вимог чинної редакції стандарту EN 228.

Отримані результати дають підстави стверджувати, що використання ЕТВЕ дозволяє знизити рівень експлуатаційних та інфраструктурних ризиків без необхідності масштабної реконструкції існуючих об'єктів паливної логістики. У цьому контексті ЕТВЕ може розглядатися як інженерно доцільне рішення для поетапної гармонізації вітчизняного ринку з європейськими нормами.

**Наукова значущість роботи** полягає у формуванні системного підходу до оцінювання експлуатаційної надійності бензинів з кисневмісними компонентами з урахуванням взаємодії властивостей пального, кліматичних чинників та технічного стану паливної інфраструктури. Практична цінність дослідження полягає в можливості використання отриманих висновків під час розроблення нормативних документів, технічних регламентів (зокрема щодо впровадження норм EN 228 та EN 590) та інженерних рішень щодо адаптації паливної інфраструктури України до використання альтернативних компонентів.

#### **Подяки**

Відсутні.

#### **Конфлікт інтересів**

Відсутній.

#### **Список використаних джерел**

1. Directive 2015/1513 of the European Parliament and of the Council of 9 September 2015 amending Directive 98/70/EC and Directive 2009/28/EC. *Official Journal of the European Union*. 2015. L 239. P. 1–29. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2015/1513/oj>.
2. Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources. *Official Journal of the European Union*. 2023. L 224. P. 1–78. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj>.
3. Directive 98/70/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 1998 relating to the quality of petrol and diesel fuels and amending Council Directive 93/12/EEC (consolidated version of 20 November 2023). *Official Journal of the European Union*. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/1998/70/oj>.
4. EN 228:2024. Automotive fuels — Unleaded petrol — Requirements and test methods. Brussels : European Committee for Standardization (CEN), 2024. 34 p. URL: <https://surl.li/ppldkm>.
5. EN 590:2022. Automotive fuels — Diesel — Requirements and test methods. Brussels : European Committee for Standardization (CEN), 2022. 38 p. URL: <https://surl.li/ppldkm>.
6. Про альтернативні види палива : Закон України від 06.06.2024 № 3356-д. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1391-14>.
7. Yoshua Lian Calvin, Pandega Atana Tamma Hariyanto, Addarda Irsyad Usman et al. Volatility and physicochemical properties of gasoline–ethanol blends with gasoline RON-based 88, 90, and 92. *Fuel*. 2022. Vol. 307. Art. 121850. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121850>.

8. Manal Amine, Barakat Y. Effect of cyclohexanol on phase stability and volatility behavior of hydrous ethanol-gasoline blends. *Egyptian Journal of Petroleum*. 2021. Vol. 30, No. 3. P. 7–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2021.04.001>.
9. Dash N., Tamilvendan D. Effective utilization of ethanol blended motor gasoline by addition of co-solvent iso-propanol. *Heliyon*. 2023. Vol. 9, No. 6. Art. e16952. DOI: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4402026>.
10. Sangian H. F., Ibrahim A. R., Mosey H. et al. Study of the composition, fuel parameter, and triangular graph of a gasoline and aqueous ethanol fuel blend in a single phase. *Revista de Chimie*. 2020. Vol. 71, No. 8. P. 113–123. DOI: <https://doi.org/10.37358/RC.20.8.8286>.
11. Boichenko S. V., Yakovlieva A. V., Tselishchev O. B. et al. Modification of motor gasoline with bioethanol in the cavitation field. *Catalysis and Petrochemistry*. 2020. No. 30. P. 56–65. DOI: <https://doi.org/10.15407/kataliz2020.30.056>.
12. Kunwer R., Pasupuleti S. R., Bhurat S. S., Gugulothu S. K., Rathore N. Blending of ethanol with gasoline and diesel fuel – A review. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 69, Part 2. P. 560–563. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.319>.
13. Bardon M., Pucher G., Cracknell R. et al. Explicit equations to estimate the flammability of blends of diesel fuel, gasoline and ethanol. *SAE Technical Paper*. 2020. No. 2020-01-2129. DOI: <https://doi.org/10.4271/2020-01-2129>.
14. Шевченко К. В., Григоров А. Б. Дослідження випаровуваності бензинової фракції після компаундування з оксигенатами. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2025. № 1. С. 71–80. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2025.1.07>.
15. Michalopoulou D.-P., Komiotou M., Zannikou Y., Karonis D. Impact of Bio-Ethanol, Bio-ETBE Addition on the Volatility of Gasoline with Oxygen Content at the Level of E10. *Fuels*. 2021. Vol. 2, No. 4. P. 501–520. DOI: <https://doi.org/10.3390/fuels2040029>.

## References

1. European Parliament and of the Council. (2015). Directive 2015/1513 of the European Parliament and of the Council of 9 September 2015 amending Directive 98/70/EC and Directive 2009/28/EC. *Official Journal of the European Union, L 239*, 1–29. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2015/1513/oj>
2. European Parliament and of the Council. (2023). Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources. *Official Journal of the European Union, L 224*, 1–78. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj>
3. European Parliament and of the Council. (1998). *Directive 98/70/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 1998 relating to the quality of petrol and diesel fuels and amending Council Directive 93/12/EEC* (consolidated version of 20 November 2023). Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/1998/70/oj>
4. European Committee for Standardization. (2024). *Automotive fuels — Unleaded petrol — Requirements and test methods* (Standard No. EN 228:2024). <https://surl.li/ppldkm>
5. European Committee for Standardization. (2022). *Automotive fuels — Diesel — Requirements and test methods* (Standard No. EN 590:2022). <https://surl.li/ppldkm>
6. Verkhovna Rada of Ukraine. (2024). *Zakon Ukrainy “Pro alternatyvni vydy palyva” vid 06.06.2024 № 3356-d* [Law of Ukraine “On Alternative Types of Fuel” dated 06.06.2024 No. 3356-d]. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1391-14> (in Ukrainian)
7. Yoshua, L. C., Pandega, A. T. H., Addarda, I. U., Muchalis, M., Cahyo, S. W., Maymuchar, Riesta, A., Nur, A. F., & Bambang, S. (2022). Volatility and physicochemical properties of gasoline–ethanol blends with gasoline RON-based 88, 90, and 92. *Fuel*, 307, Article 121850. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121850>
8. Manal, A., & Barakat, Y. (2021). Effect of cyclohexanol on phase stability and volatility behavior of hydrous ethanol-gasoline blends. *Egyptian Journal of Petroleum*, 30(3), 7–12. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2021.04.001>
9. Dash, N., & Tamilvendan, D. (2023). Effective utilization of ethanol blended motor gasoline by addition of co-solvent iso-propanol. *Heliyon*, 9(6), Article e16952. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4402026>
10. Sangian, H. F., Ibrahim, A. R., Mosey, H., et al. (2020). Study of the composition, fuel parameter, and triangular graph of a gasoline and aqueous ethanol fuel blend in a single phase. *Revista de Chimie*, 71(8), 113–123. <https://doi.org/10.37358/RC.20.8.8286>

11. Boichenko, S. V., Yakovlieva, A. V., Tselishchev, O. B., et al. (2020). Modification of motor gasoline with bioethanol in the cavitation field. *Catalysis and Petrochemistry*, (30), 56–65. <https://doi.org/10.15407/kataliz2020.30.056>
12. Kunwer, R., Pasupuleti, S. R., Bhurat, S. S., Gugulothu, S. K., & Rathore, N. Blending of ethanol with gasoline and diesel fuel – A review. *Materials Today: Proceedings*, 69(2), 560–563. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.319>
13. Bardon, M., Pucher, G., Cracknell, R., et al. (2020). *Explicit equations to estimate the flammability of blends of diesel fuel, gasoline and ethanol* (SAE Technical Paper No. 2020-01-2129). SAE International. <https://doi.org/10.4271/2020-01-2129>
14. Shevchenko, K. V., & Hryhorov, A. B. (2025). Doslidzhennia vyparovuvanosti benzynovoi fraktsii pislia kompaunduvannia z oksyhenatamy [Study of the volatility of the gasoline fraction after compounding with oxygenates]. *Inhtehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*, (1), 71–80. <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2025.1.07> (in Ukrainian)
15. Michalopoulou, D.-P., Komiotou, M., Zannikou, Y., & Karonis, D. (2021). Impact of bio-ethanol, bio-ETBE addition on the volatility of gasoline with oxygen content at the level of E10. *Fuels*, 2(4), 501–520. <https://doi.org/10.3390/fuels2040029>

## SYSTEM-LEVEL ASSESSMENT OF THE OPERATIONAL RELIABILITY OF BIOETHANOL-BLENDED GASOLINE WITHIN UKRAINE'S FUEL INFRASTRUCTURE

### Doroshenko Yu. I.

PhD in Technical Sciences, Associate Professor  
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas  
76000, 15 Karpatska Str., Ivano-Frankivsk, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-7196-9383>  
e-mail: yuliia.doroshenko@nung.edu.ua

### Liuta N. V.

PhD in Technical Sciences, Associate Professor  
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas  
76000, 15 Karpatska Str., Ivano-Frankivsk, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-3321-0982>  
e-mail: natalia.liuta@nung.edu.ua

**Abstract.** The growing use of bioethanol as an oxygenate in motor petrol is a key component of the energy transition and the harmonisation of Ukraine's fuel market with European standards. The aim of this article is to conduct a systematic analysis of the operational reliability of bioethanol-blended petrol within Ukraine's fuel infrastructure, with a focus on tank storage and transport processes. The study is based on a review of regulatory requirements, an analysis of the physico-chemical properties of petrol-ethanol fuels, and an assessment of operational factors affecting fuel stability during handling. Particular attention is paid to the hygroscopicity of bioethanol, the mechanisms of water accumulation in tanks, the phase stability of the 'petrol–bioethanol–water' system, and the operational consequences of possible phase separation. It is shown that increased moisture content leads to a reduction in fuel quality, increased corrosion activity, and a risk of microbiological contamination of fuel infrastructure components. The influence of bioethanol on the saturated vapour pressure and volatility of petrol is substantiated; under conditions of seasonal temperature fluctuations, this leads to an increase in evaporation losses and the load on tank venting systems. It has been established that the combined effect of these factors creates a systemic risk of reduced operational reliability of Ukraine's fuel infrastructure, which in many cases is not fully adapted to the use of petrol-ethanol blends. Based on the analysis, practical recommendations have been formulated to reduce operational risks, including stricter control of water content, optimisation of storage conditions, improved equipment sealing, and the advisability of using alternative oxygen-containing components, such as ETBE. The results obtained can be used by fuel sector specialists, oil depot and petrol station operators, and regulatory bodies to improve the reliability of the distribution of petrol blended with bioethanol in Ukraine.

**Keywords:** base fuel; oxygenate; phase stability; hygroscopicity; evaporative losses; oxygen-containing components.