

С.С. Кравченко, А.О. Прохоренко, А.П. Кузьменко

АДАПТАЦІЯ АВТОМОБІЛЬНОГО БЕНЗИНОВОГО ДВИГУНА ДЛЯ РОБОТИ НА СУМІШЕВОМУ ПАЛИВІ З БІОЕТАНОЛОМ

У зв'язку з впровадженням в Україні з 1 травня 2025 року нових екологічних стандартів, які зобов'язують додавати щонайменше 5% біоетанолу до бензину з октановим числом менше 98, актуальним стало питання адаптації автомобільних вживаних бензинових двигунів до роботи на сумішевому паливі. Біоетанол, як відновлюване джерело енергії, має інші фізико-хімічні властивості порівняно з бензином, що впливає на процес згорання, а як наслідок – на потужність, економічність та екологічність двигуна. В роботі проаналізовано вплив додавання біоетанолу до бензину на параметри паливо-повітряної суміші, зокрема на коефіцієнт надлишку повітря, її теплотворну здатність та межі запалювання. Стехіометричне відношення бензино-повітряної та біоетаноло-повітряної суміші відрізняється, що призводить до порушення якості горючої суміші і зміни потужнісних (або економічних) показників двигуна. Зменшення теплотворної здатності суміші з біоетанолом також може призвести до зменшення потужності двигуна (до 40%). Показано, що при додаванні до бензину 25 % біоетанолу теплотворна здатність паливо-повітряної суміші зменшується на 9%, що призводить до відповідного зменшення потужності двигуна. А при концентрації біоетанолу 30–60% суміш може виходити за межі запалюваності, що унеможливує її ефективне використання без додаткових технічних рішень. Розглянуто сучасні підходи до адаптації двигунів, зокрема застосування корекції подачі палива на основі даних сенсорів вмісту етанолу, на основі датчика кисню у відпрацьованих газах (closed loop) з подальшим обчисленням вмісту біоетанолу. Зазначено, що більшість сучасних двигунів можуть працювати на паливі з вмістом етанолу до 15% без модифікацій, однак для вищих концентрацій необхідне програмно-апаратне доопрацювання, наприклад, встановлення адаптерів типу Digital E85 Adapter або внесення змін до програмного забезпечення ЕБК. Результати дослідження підкреслюють необхідність проведення теоретичних і експериментальних робіт для забезпечення ефективної адаптації двигунів до нових паливних стандартів.

Ключові слова: двигун з примусовим запалюванням, біоетанол, фізико-хімічні властивості, адаптація, теплотворна здатність, стехіометричне співвідношення, межі запалювання

Вступ

З 1 травня 2025 року в Україні почали діяти нові екологічні стандарти для пального, які вимагають, щоб всі бензини з октановим числом меншим 98 містили щонайменше 5% біоетанолу. Ці нововведення є частиною загальної стратегії, спрямованої на зменшення забруднення навколишнього середовища, підвищення енергетичної незалежності країни та приведення національного законодавства у відповідність до стандартів Європейського Союзу [1,2]

Біоетанол – це безводний високооктановий етиловий спирт (октанове число – 105), отриманий у процесі переробки відновлювальної рослинної сировини методом ферментації цукрів мікроорганізмами, який використовується в якості моторного палива. Він містить не менше 99% етилового спирту за об'ємом [3,4].

Товарні бензини, що містять біоетанол, позначаються літерою Е з подальшим вказанням у % об'ємного вмісту біоетанолу, наприклад А-95-Е5 – містить 5% спирту, а А-95-Е10 – 10% і т.п.

Автомобілі, що наразі випускаються серійно для роботи на двокомпонентному паливі, використовують два основні конструктивні підходи:

1. У паливну систему встановлюється сенсор вмісту етанолу (Ethanol contentsensor), який визначає відсоток етанолу в паливі. На основі цих даних

відбувається корекція подачі палива. Цей підхід використовується в автомобілях у США, а також у Європі (Volvo, Saab, Ford) [3,5-6].

2. Математичне обчислення вмісту біоетанолу на основі корекцій за зворотним зв'язком від датчика кисню у відпрацьованих газах (closed loop). Однак автомобілі з такою опцією коштують на 800-1000 євро дорожче (використовується компанією PSA Peugeot Citroen) [7].

Провідними виробниками автомобілів та автомобільних двигунів (наприклад Volvo, Volkswagen, Chevrolet, Renault, Ford та ін.) розроблена і масово випускається система Flexible-fuel, що дозволяє забезпечити нормальну роботу без втрати потужнісних параметрів двигуна на бензино-етанольній суміші залежно від складу такого палива автоматично [5,6].

Стандартним паливом для автомобілів із двигунами «Flex-Fuel» є Е85, тому що через нижчу енергоємність біоетанол коштує дешевше, ніж бензин чи дизельне паливо. Також використовується й паливо Е95 – суміш 95% біоетанолу і 5% паливної присадки. Наприклад, компанія Scania (Швеція) серійно виробляє дизельні автобуси та вантажівки, що працюють на 95% біоетанолі [8].

У світі також ведуться розробки тракторів, здатних працювати на біоетанолі. Компанія John Deere створила високотехнологічний двигун, який може працювати на різних видах палива, як нафтового,

так і біологічного походження[9]. Це паливо може заливатися в бак окремо або в суміші у відповідних пропорціях. Декілька датчиків вимірюють різноманітні параметри палива або його суміші, а електронний блок керування (ЕБК) коригує параметри роботи двигуна для досягнення відповідних норм викидів токсичних речовин.

Таким чином, враховуючи, що в Україні почали діяти нові екологічні стандарти для пального доцільно провести дослідження, які пов'язані з адаптацією вживаних автомобільних бензинових двигунів для роботи на бензино-біоетанолових сумішах.

Метою дослідження є розробка теоретичних основ адаптації автомобільного бензинового двигуна для роботи на сумішевому паливі з біоетанолом.

Аналіз публікацій

Біоетанол можна отримувати з відновлюваних джерел, таких як біомаса та сільськогосподарська сировина, тому його широко використовують як альтернативне паливо в двигунах із іскровим запалюванням [3,10,14-28]. Відомо, що етанол в якості палива для ДВЗ почали використовувати ще з 1896 року, а в 1908 році Генрі Форд розробив відомий автомобіль Ford Model T, який міг рухатися як на комбінації бензину, так і на етанолі [10]. Бразилія була однією з найбільших країн у світі, яка впровадила програми біопалива у виробництві етанолу з цукрової тростини [11]. У 2006 році бразильці використовували 18% етанолу для дорожнього транспортного сектору своєї країни, а до квітня 2008 року – вже понад 50% споживання палива на ринку бензину. Сьогодні Бразилія та США є світовими лідерами з виробництва біоетанолу – у 2022 році вони виробляли 81% світового спиртового палива [12].

За своїми фізико-хімічними властивостями етанол значно відрізняється від бензину, що в свою чергу призводить до змін в робочому процесі двигуна. Наприклад, швидкість поширення полум'я в біоетанолу вища, ніж у бензині, а його високе октанове число дозволяє використовувати двигуни з більшим ступенем стиску [14,15]. Завдяки наявності гідроксильної групи етанол забезпечує швидке згоряння [16]. Також він згорає чистіше за бензин і утворює меншу емісію CO, HC та NOx. Висока теплота пароутворення біоетанолу сприяє зниженню максимальної температури в циліндрі, що, у свою чергу, зменшує викиди NOx і підвищує потужність двигуна [17, 22, 25-28].

Попри численні переваги, що покращують процес згоряння, використання біоетанолу в двигунах з іскровим запалюванням обмежується його високою прихованою теплотою пароутворення та низькою

енергетичною щільністю. Водночас така висока теплота пароутворення сприяє підвищенню коефіцієнту наповнення завдяки охолоджувальному ефекту [18]. Крім того, біоетанол має низьку дифузійність і важко запалюється за низьких температур [19, 20], що призводить до неповного згоряння [21] та негативно впливає на економічність двигуна і рівень його викидів [19].

В роботі [22] розглянуто вплив неестильованого бензину (Е0) та сумішей неестильованого бензину та етанолу (Е50 та Е85) на роботу одноциліндрового чотиритактного двигуна з іскровим запалюванням при двох значеннях ступенях стиску – 10 та 11. Результати випробувань двигуна показали, що додавання етанолу до неестильованого бензину збільшує крутний момент, потужність та витрату палива двигуна, а також зменшує викиди чадного газу (CO), оксидів азоту (NOx) та вуглеводнів (HC). Суміші етанолу та бензину дозволяють збільшити ступінь стиснення без виникнення детонації.

В роботі [23] експериментально досліджено ефективні та екологічні показники двигуна з іскровим запалюванням, використовуючи суміш етанолу та бензину у співвідношеннях 5%, 10%, 20% та 30%. Зі збільшенням кількості етанолу теплотворна здатність суміші палива знижується, тоді як октанове число суміші палива збільшується. При використанні суміші палива етанолу та бензину максимальний крутний момент двигуна збільшуються, але при цьому погіршується економічність двигуна. Подібні дослідження проведені в [23], де стверджується, що збільшення потужності спостерігається при додаванні етанолу до 10% за об'ємом.

У роботі [25] було визначено, що найбільш придатна суміш для двигунів з іскровим запалюванням, з точки зору ефективності циклу та екологічності, становить від 7,5% до 16,5%. При цьому зменшується емісія CO з відпрацьованими газами, тоді як викиди NO збільшуються через підвищення температури робочого тіла в циліндрі.

В дослідженнях [26] представлені експериментальні результати роботи двигуна з примусовим запалюванням, що працює на бензині, етанолі та сумішах бензину, етанолу та водню відповідно. При роботі двигуна на паливі G80E20, ефективність двигуна та викиди погіршувалися у порівнянні з роботою на бензині. Проте, додавання водню до суміші бензину та етанолу покращувало процес згоряння та підвищувало ефективність згоряння, розширювало діапазон горючості суміші бензину та етанолу, зменшуючи викиди з відпрацьованими газами. Однак значення викидів оксиду азоту збільшувалися з додаванням водню.

У 4-тактному двигуні з іскровим запалюванням суміш біоетанолу може покращити процес згоряння, зменшуючи викиди вуглеводнів НС та чадного газу СО, навіть у 20% суміші етанолу та бензину рівень викидів оксиду азоту (NOx) зменшується на 50% без будь-якої зміни потужності двигуна [27].

Таким чином, біоетанол – це перспективне поновлюване паливо для двигунів із іскровим запалюванням, яке забезпечує підвищення ефективності згоряння, зменшення викидів СО, НС та NOx, а також дає змогу підвищити ступінь стиснення без ризику детонації. Водночас його застосування обмежується низькою енергетичною щільністю, складністю займання при низьких температурах й потенційним погіршенням економічності при високій концентрації в паливній суміші. Найефективнішими з точки зору балансу «екологічність/продуктивність» є суміші з вмістом етанолу в межах 7,5–20%.

Викладення матеріалу

Проблема полягає в тому, що етиловий спирт (етанол) має відмінні від бензину фізико-хімічні властивості. Зокрема, у цих речовин відрізняються: нижча теплота згоряння, густина, молярна маса, стехіометричне відношення та ін. (див. табл. 1). До пропорційної зміни цих параметрів палива призводитиме і будь-яка добавка етанолу в бензин.

Таблиця 1. Фізико-хімічні властивості палив

Параметр	Од. вимір.	Паливо	
		Бензин	Етанол
Нижча теплота згоряння, Q_n	кДж/кг	44000	26800
Густина, ρ	кг/м ³	750	790
Молярна маса, μ_m	кг/кмоль	114	46
Масове стехіометричне відношення, L_0	кг пов./кг палив.	14,7	9

Кількість поданого при роботі двигуна в суміш палива керується часом впорскування, визначеним електронним блоком управління за закладеною в нього програмою. У програмі ЕБК перераховані параметри введені у вигляді констант (явних або неявних) для бензину. Отже, будь-яке застосування палива іншого складу призведе до порушення якості приготовленої горючої суміші і, як наслідок, зміни потужнісних (або економічних) показників двигуна. Наприклад, зміна дійсного коефіцієнта надлишку повітря в суміші α_d залежно від вмісту в паливі етанолу показана на рис. 1.

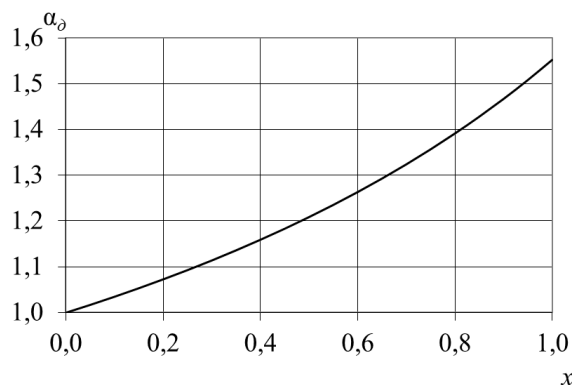


Рис. 1. Зміна дійсного коефіцієнта надлишку повітря в суміші α_d залежно від вмісту в паливі етанолу x

Обчислення необхідної тривалості впорскування в програмі ЕБК проводиться за формулою:

$$\tau_{впр} = f(V_{сн-б}),$$

де $V_{сн-б}$ – необхідна об'ємна подача палива

$$V_{сн-б} = \frac{G_g}{\rho_b \alpha L_{0б}}.$$

G_g – поточна масова витрата повітря (визначається датчиком MAF), ρ_b – стандартна щільність бензину (введена в програму константа), $L_{0б}$ – стехіометричне відношення для суміші бензин-повітря (константа, як правило дорівнює 14,7 кг повітря/кг палива), α – необхідний для роботи на даному режимі коефіцієнт надлишку повітря (як правило рівний 1). Таким чином, програма ЕБК готує «стехіометричну» суміш, не враховуючи дійсні значення фізико-хімічних властивості палива.

Дійсний же коефіцієнт надлишку повітря визначається дійсними параметрами палива і буде мати значення:

$$\alpha_d = \frac{G_g}{V_{сн-б} \rho_{сн-б} L_{0сн-б}} = \alpha \frac{\rho_b L_{0б}}{\rho_{сн-б} L_{0сн-б}},$$

що і проілюстровано на рис. 1. Наприклад, при застосуванні бензо-етанольної суміші з вмістом етанолу 25% дійсний коефіцієнт надлишку повітря становитиме $\alpha=1,093$.

Слід зауважити, що густина, стехіометричне відношення, нижча теплота згоряння сумішевого бензо-етанольного палива може бути обчислена адитивно. Відповідно:

$$\rho_{сн-б} = x\rho_{сн} + (1-x)\rho_b,$$

$$L_{0сн-б} = xL_{0сн} + (1-x)L_{0б},$$

$$Q_{нсн-б} = xQ_{нсн} + (1-x)Q_{нб}.$$

Тут x – об'ємний вміст етанолу в суміші з бензином.

Зміну потужності двигуна при застосуванні сумішевого бензин-етанольного палива можна оцінити за теплотворною здатністю суміші, поданої в циліндр. Її маса складе:

$$G_{\text{сп-б}} = V_{\text{сп-б}} \rho_{\text{сп-б}} = \frac{\rho_{\text{сп-б}} G_{\text{в}}}{\rho_{\text{б}} \alpha L_{0\text{б}}}.$$

Теплотворна здатність:

$$Q_{\text{сп-б}} = G_{\text{сп-б}} Q_{\text{нсп-б}} = Q_{\text{нсп-б}} \frac{\rho_{\text{сп-б}} G_{\text{в}}}{\rho_{\text{б}} \alpha L_{0\text{б}}}.$$

При цьому «видима», підрахована ЕБК теплотворна здатність складе величину:

$$Q_{\text{б}} = Q_{\text{нб}} \frac{G_{\text{в}}}{\alpha L_{0\text{б}}}.$$

Відношення

$$\bar{Q} = \frac{Q_{\text{сп-б}}}{Q_{\text{б}}} = \frac{Q_{\text{нсп-б}}}{Q_{\text{нб}}} \frac{\rho_{\text{сп-б}}}{\rho_{\text{б}}}.$$

говорить про втрату потужності двигуна внаслідок «неправильної» роботи програми ЕБК.

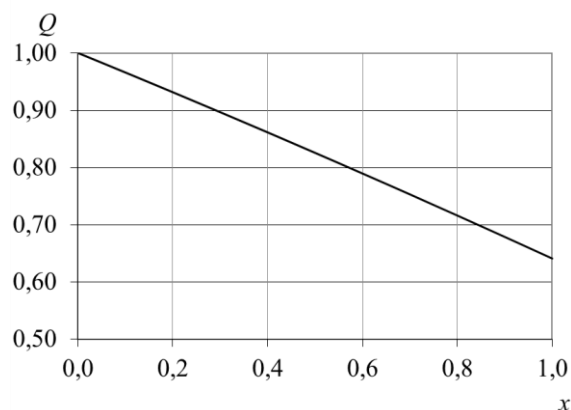


Рис. 2. Відносна теплота згоряння суміші від вмісту в паливі етанолу x

Зменшення потужності двигуна може досягати 40% (рис.2). Наприклад, при додаванні до бензину 25 % етанолу теплотворна здатність паливо-повітряної суміші зменшиться на 9%, що призведе до відповідного зменшення потужності двигуна.

Нижня межа запалювання бензину за коефіцієнтом надлишку повітря складає величину $\alpha_{\text{нб}}=1,3$. Цей параметр для етанолу $\alpha_{\text{нсп}}=2,05$. Звідси випливає, що при певних концентраціях у сумішевому паливі цих речовин паливо-повітряна суміш буде мати утруднене запалювання.

Коефіцієнт надлишку повітря в паливо-повітряній суміші за бензином:

$$\alpha_{\text{б}} = \frac{G_{\text{в}}}{(1-x)V_{\text{сп-б}}\rho_{\text{б}}L_{0\text{б}}}.$$

За етанолом:

$$\alpha_{\text{сп}} = \frac{G_{\text{в}}}{xV_{\text{сп-б}}\rho_{\text{сп}}L_{0\text{сп}}}.$$

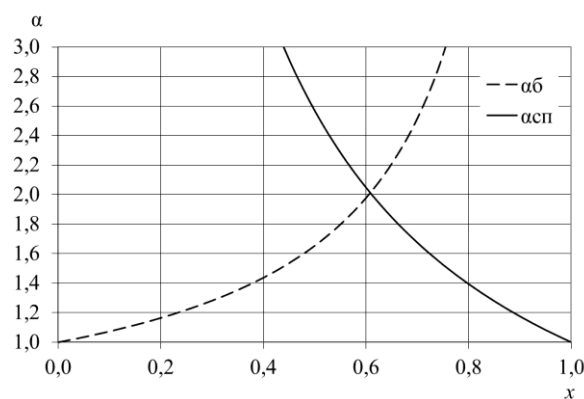


Рис. 3. Залежність еквівалентних коефіцієнтів надлишку повітря в суміші за етанолом ($\alpha_{\text{сп}}$) та бензином ($\alpha_{\text{б}}$) від вмісту в паливі етанолу x

Як видно з результатів розрахунків, представлених на рис. 3, у сумішевому паливі, що містить від 30 до 60 % етанолу за нижню межу запалюваності виходять коефіцієнти надлишку повітря обох компонентів. Цим фактом і визначається неможливість використання сумішевих палив такого складу.

Проведені дослідження щодо проблеми використання в автомобільних двигунах біоетанолу стосуються, в основному, питань забезпечення надійності їх конструкції та експлуатації, а саме – впливу такого палива на працездатність вузлів системи зберігання та подачі палива. Так, відомо, що наявність спирту в паливній системі може призводити до появи корозії, руйнування гумових ущільнень, засмічення паливних фільтрів внаслідок «мийного» ефекту спирту та ін. Проблемам же, викладеним вище, уваги в наукових дослідженнях приділяється мало. Вважається, що перелічені вище питання вирішені виробниками і додаткових фундаментальних досліджень не потребують.

Провідними виробниками автомобілів та автомобільних двигунів (наприклад Volvo, Volkswagen, Chevrolet, Renault, Ford та ін.) розроблена і масово випускається система Flexible-fuel, що дозволяє забезпечити нормальну роботу без втрати потужностних параметрів двигуна на бензино-етанольній суміші залежно від складу такого палива автоматично.

Однак, перелічені проблеми актуальні для автомобілів та їх двигунів, що знаходяться в експлуатації. Вважається, що більшість двигунів внутрішнього згоряння без доопрацювання паливних систем здатні працювати на сумішах, що містять до 15% етанолу, і тільки якщо відсотковий вміст спирту вище 15% – необхідно вдосконалити двигун. Вони

можуть бути виправлені програмно-апаратним шляхом.

Так, відомі рішення у вигляді встановлення спеціальних адаптерів, підключених в електронну систему управління «Digital E85 Adapter» та інші [3, 5, 6], точніше – в розрив керуючого дроту форсунки. Принцип дії такого адаптера полягає в деякому пропорційному збільшенні тривалості подачі керуючого сигналу на електромагніт форсунки.

На нашу думку, повністю вирішити проблему можна шляхом внесення відповідних коригувань безпосередньо в програму керування двигуном. Для цього необхідно проведення комплексу теоретичних та експериментальних робіт, включаючи стендові випробування, моделювання роботи двигуна з використанням спеціалізованих програм, розробку рекомендацій та рішень щодо виправлення таблиць управління двигуна.

Висновки

В роботі проаналізовані проблеми пов'язані з адаптацією автомобільного бензинового двигуна для роботи на сумішевому паливі з біоетанолом.

1. Проаналізовано відмінності фізико-хімічних властивостей етилового спирту та бензину. Ці палива за своїми властивостями відрізняються: нижчею теплотою згоряння, густиною, молярною масою, стехіометричним відношенням. Відповідно, будь-яка добавка етанолу в бензин буде призводити до пропорційної зміни цих властивостей.

2. Застосування спиртовмісних палив в двигунах з електронним керуванням, які налаштовані заводом-виробником для роботи на бензині може призвести до змін у роботі двигуна, впливаючи на його потужність та економічність. Так, наприклад, при застосуванні бензо-етанольної суміші з вмістом етанолу 25% дійсний коефіцієнт надлишку повітря становитиме $\alpha=1,093$, а теплотворна здатність суміші зменшиться на 9%.

3. У сумішевому паливі, що містить від 30 до 60 % етанолу за нижню межу запалюваності виходять коефіцієнти надлишку повітря обох компонентів. Цим фактом і визначається неможливість використання сумішевих палив такого складу.

4. Пропонуються методи адаптації двигунів до використання біоетаноловмісного палива, зокрема через корекцію паливоподачі на основі даних сенсорів вмісту біоетанолу або сигналів датчика кисню у відпрацьованих газах з подальшим визначенням концентрації біоетанолу.

5. Більшість сучасних двигунів здатні працювати на сумішах із вмістом етанолу до 15% без конструктивних змін, проте для використання палива з

вищим вмістом спирту потрібне програмно-апаратне доопрацювання – як-от встановлення адаптерів типу Digital E85 Adapter або оновлення програмного забезпечення ЕБК.

6. Отримані результати підкреслюють важливість проведення подальших як теоретичних, так і практичних досліджень для забезпечення ефективної інтеграції двигунів у нові паливні стандарти.

Список літератури:

1. Закон України «Про альтернативні палива», URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1391-14#Text>. (дата звернення 22.06.2025)
2. Закон України, «Про внесення змін до деяких законів України щодо обов'язковості використання рідкого біопалива (біокомпонентів) у галузі транспорту» від 04.06.2024 № 3356-д, URL: <https://ips.ligazakon.net/document/JI03586I?an=6&scop=78&fcor=209> (дата звернення 22.06.2025)
3. Сосіда С. В. Поліпшення паливної економічності двигуна з іскровим запалюванням при використанні спиртовмісної добавки до бензину : дис. ... д-ра філософії у галузі 14 Електр. інженерія : 142 / НТУ. Київ, 2024. 240 с. 4. Поляшенко С.О. Використання біоетанолу як альтернативного джерела енергії / С.О. Поляшенко, Д.І. Гасенко // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Автомобільний транспорт в аграрному секторі: проектування, дизайн та технологічна експлуатація». – 2022. – С. 157-158. 5. Fahrenbruch, A. and Bachmann, J., “Ethanol Sensors for Flex Fuel Operation,” MTZ Worldwide 69, no. 9 (September 2008): 46-49. DOI:10.1007/bf03227915. 6. AudiService Training Audi Двигун 2,0 TFSI flexible fuel Програма самонавчання. 43 (31 см.). URL: https://esperformance.net/ssp/audi/SSP_439_RU.pdf (дата звернення: 20.06.2025). 7. Citroen C4 BioFlex brings ethanol to Europe. <https://www.carsales.com.au/editorial/details/citroen-c4-bioflex-brings-ethanol-to-europe-4827/>. 26.08.2007. URL: <https://www.carsales.com.au/editorial/details/citroen-c4-bioflex-brings-ethanol-to-europe-4827/> (дата звернення: 20.06.2025). 8. Біоетанол: практика та застосування. Досвід UTC. <https://uabio.org/>. 01.10.2020. URL: <https://uabio.org/materials/8798/anol-to-europe-4827/> (дата звернення: 20.06.2025). 9. John Deere розробляє мультипаливний двигун // Аграрний ринок. – 2022. – 29 вересня. – Режим доступу: <https://news.finance.ua/ua/john-deere-rozroblyaye-mul-typalyvnyy-dvyhun> (дата звернення: 20.06.2025). 10. Goettemoeller J. Sustainable Ethanol: Biofuels, Biorefineries, Cellulosic Biomass, Flex-Fuel Vehicles, and Sustainable Farming for Energy Independence / J. Goettemoeller, A. Goettemoeller. – Maryville, MO: Prairie Oak Publishing, 2007. – 42 p. – Available from: <https://trove.nla.gov.au/version/44722736>. 11. Inslee J. Homegrown Energy. In: Apollo's Fire / J. Inslee, H. Bracken. – Washington, D.C: Island Press, 2007. – P. 153–155, 160–161. – ISBN: 978-1-59726-175-3. 12. AC GROUP. Що таке взагалі біоетанол? available at : <https://ac-group.in.ua/blog/що-таке-взагалі-біоетанол>. 13. Thring R.H. Alternative fuels for spark-ignition engines / R.H. Thring // SAE Technical Paper. – 1983. – № 831685. – DOI: <https://doi.org/10.4271/831685>. 14. Desoky A.A. A study on the combustion of alternative fuels in spark-ignited engines / A.A. Desoky, S.H. El-Emam // International Journal of Hydrogen Energy. – 1985. – Vol. 10. – P. 497–504. 15. Cooney A.P.

Combustion characterization in an internal combustion engine with ethanol gasoline blended fuels varying compression ratios and ignition timing/ A.P. Cooney, J.J. Yeliana, J.D. Worm, J.D. Naber // *Energy & Fuels*. – 2009. – Vol. 23. – P. 19–24. – DOI: 10.1021/ef800899r. 16. Jia L.W. Influence of ethanol-gasoline blended fuel on emission characteristics from a four-stroke motorcycle engine / Jia L.W., Shen M.Q., Wang J., Lin M.Q. // *Journal of Hazardous Materials*. – 2005. – Vol. 23. – P. 29–34. – DOI: 10.1016/j.jhazmat.2005.03.046. 17. Norman D.B. Ethanol fuel – a single-cylinder engine study of efficiency and exhaust emissions / D.B. Norman // *SAE Technical Paper*. – 1981. – № 810345. – P. 10–24. – DOI: <https://doi.org/10.4271/810345>. 18. Sodr  J.R. Cold start characteristics of an ethanol-fuelled engine with heated intake air and fuel / J.R. Sodr , L.C. Monteiro Sales // *Applied Thermal Engineering*. – 2012. – Vol. 40. – P. 198–201. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.01.057. 19. Shuofeng W. Effect of hydrogen addition on combustion and emissions performance of a spark-ignited ethanol engine at idle and stoichiometric conditions / W. Shuofeng, C. Ji, B. Zhang // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2010. – Vol. 35. – P. 9205–9213. – DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.06.026. 20. Park C. Performance and exhaust emission characteristics of a spark ignition engine using ethanol and ethanol-reformed gas / C. Park, Y. Choi, C. Kim, S. Oh, G. Lim, Y. Moriyoshi // *Fuel*. – 2010. – Vol. 89. – P. 2118–2125. – DOI: 10.1016/j.fuel.2010.03.018. 21. Al-Hamamre Z. The effect of hydrogen addition on premixed laminar acetylene–hydrogen–air and ethanol–hydrogen–air flames / Z. Al-Hamamre, J. Yamin // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2013. – Vol. 38. – P. 7499–7509. – DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.03.125. 22. Ko  M. The effects of ethanol–unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emissions in a spark-ignition engine / M. Ko , Y. Sekmen, T. Topgu, H.S. Yuc su // *Renewable Energy*. – 2009. – Vol. 34, № 10. – P. 2101–2106. – DOI: 10.1016/j.renene.2009.01.018. 23. Hsieh W.D. Engine performance and pollutant emission of an SI engine using ethanol–gasoline blended fuels / W.D. Hsieh, R.H. Chen, T.L. Wu, T.H. Lin // *Atmospheric Environment*. – 2002. – Vol. 36, № 3. – P. 403–410. – DOI: 10.1016/S1352-2310(01)00508-8. 24. Abdel-Rahman A.A. Experimental investigation on varying the compression ratio of SI engine working under different ethanol–gasoline fuel blends / A.A. Abdel-Rahman, M.M. Osman // *International Journal of Energy Research*. – 1998. – Vol. 21, № 1. – P. 31–40. – DOI: 10.1002/(SICI)1099-114X(199701)21:1<31::AID-ER235>3.0.CO;2-5. 25. Bayraktar H. Experimental and theoretical investigation of using gasoline–ethanol blends in spark ignition engines / H. Bayraktar // *Renewable Energy*. – 2005. – Vol. 30. – P. 1733–1747. – DOI: 10.1016/j.renene.2005.01.006. 26. Akansu S. Experimental study of gasoline-ethanol-hydrogen blends combustion in an SI engine / S. Akansu, S. Tang z, N. Kahraman, M. İlhak, S. A ıkg z // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2017. – Vol. 42. – P. 25781–25790. – DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.07.014. 27. Hawas M.N. Improve the performance and efficiency of turbocharging spark ignition engine by using blended bioethanol fuel / M.N. Hawas, A.A. Mohammed, A.H. Fahem // *Journal of Engineering Science and Technology*. – 2020. – Vol. 15, № 6. – P. 3547–3558. 28. Sugita I.W. Effect of pentalite–methanol blends on performance and exhaust emission of a four-stroke 125 cc motorcycle engine / I.W. Sugita, D.R.B. Syaka, A.I. Wahyudi // 3rd UNJ International Conference on Technical and Vocational Education and Training 2018. – *KnE Social Science*. – 2019. – P. 384–393.

Bibliography (transliterated):

1. Law of Ukraine "On Alternative Fuels" [Zakon Ukrainy «Pro alternatyvni palyva», available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1391-14#Text>]. 2. Law of Ukraine, "On Amendments to Certain Laws of Ukraine Regarding the Mandatory Use of Liquid Biofuels (Biocomponents) in the Transport Sector" dated 04.06.2024 No. 3356-d [Zakon Ukrainy, «Pro vnesennia zmin do deiakyykh zakoniv Ukrainy shchodo oboviazkovosti vykorystannia riddkoho biopalyva (biokomponentiv) u haluzi transportu» vid 04.06.2024 № 3356-d], available at: <https://ips.ligazakon.net/document/JI03586I?an=6&scop=78&fcp=209>. 3. Sosida S. V. (2024). Improving the fuel efficiency of a spark-ignition engine when using an alcohol-containing additive to gasoline: PhD thesis in the field of 14 Electrical engineering [Polipshennia palyvnoi ekonomichnosti dvyhuna z iskrovym zapalivanniam pry vykorystanni spyrtovmisnoi dobavky do benzynu : dys. d-ra filosofii u haluzi 14 Elektr. inzheneriia], Kyiv, 240 p. 4. Polyashenko S., Gasenko D. (2022) " Using bioethanol as an alternative energy source", *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Automobile Transport in the Agricultural Sector: Planning, Design and Technological Operation"*, 2022, pp. 157-158. 5. Fahrenbruch, A. and Bachmann, J., "Ethanol Sensors for. Flex Fuel Operation," *MTZ Worldwide* 69, no. 9 (September. 2008): 46-49. DOI:10.1007/bf03227915 6. AudiService Training Audi Engine 2.0 TFSI flexible fuel. Self-study program. 43 (31 pages)., available at: https://esperformance.net/ssp/audi/SSP_439_RU.pdf 7. Citroen C4 BioFlex brings ethanol to Europe, available at: <https://www.carsales.com.au/editorial/details/citroen-c4-bioflex-brings-ethanol-to-europe-4827.8>. 8. Bioethanol: Practice and Application. UTC Experience [Bioetanol: praktyka ta zastosuvannia. Dosvid UTC], available at: <https://uabio.org/materials/8798/anol-to-europe-4827/>. 9. John Deere develops multi-fuel engine [John Deere rozroblyae multypalyvnyi dvyhun], available at: <https://news.finance.ua/ua/john-deere-rozroblyaye-mul-typalyvnyi-dvyhun>. 10. Goettemoeller, J. & Goettemoeller, A. (2007) *Sustainable ethanol : biofuels, biorefineries, cellulosic biomass, flex-fuel vehicles, and sustainable farming for energy independence*. Maryville, Mo: Prairie Oak Pub. Available from: <https://trove.nla.gov.au/version/44722736>. 11. Inslee J and Hendricks B (2008) *Apollo's fire : igniting America's clean-energy economy*, Island Press, Washington, DC. 12. AC GROUP. What is bioethanol anyway? [AC GROUP. Shcho take vazhali bioetanol?], available at: <https://ac-group.in.ua/blog/що-такє-важали-біоетанол>. 13. Thring R.H., (1983) "Alternative Fuels for Spark-Ignition Engines," *SAE Technical Paper* 831685, 1983, <https://doi.org/10.4271/831685>. 14. Desoky AA, El-Emam SH. (1985) A study on the combustion of alternative fuel in spark ignition engines. *Int. J. Hydrogen Energy* 1985;10(8):497–504. 15. Cooney AP, Yeliana JJ, Worm JD, Naber JD. (2009) Combustion characterization in an internal combustion engine with ethanol gasoline blended fuels varying compression ratios and ignition timing. *Energy Fuels* 2009; vol. 23. p.19-24. DOI: 10.1021/ef800899r. 16. Jia LW, Shen MQ, Wang J, Lin MQ. (2005) Influence of ethanolgasoline blended fuel on emission characteristics from a four-stroke motorcycle engine. *J Hazard Mater* 2005; vol23. p.29-34. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2005.03.046. 17. Norman DB. (1981) Ethanol Fuel-A Single-Cylinder Engine Study of Efficiency and Exhaust Emissions. *SAE Technical Paper* 810345,; 1981. p. 10-24. DOI: 10.4271/810345. 18. Sodr  J. R., & Monteiro Sales, L. C. (2012) Cold start characteristics of an ethanolfuelled engine

with heated intake air and fuel. *Appl Therm Eng* 2012; vol.40. p.198-201. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.01.057 19. Shuofeng W, Changwei Ji, Zhang Bo. (2010) Effect of hydrogen addition on combustion and emissions performance of a spark-ignited ethanol engine at idle and stoichiometric conditions. *Int J Hydrogen Energy* 2010;vol.35 p.9205-9213. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.06.026 20. Park C, Choi Y, Kim C, Oh S, Lim G, Moriyoshi Y. (2010) Performance and exhaust emission characteristics of a spark ignition engine using ethanol and ethanol-reformed gas. *Fuel* 2010;vol.89 p.2118-2125. DOI: 10.1016/j.fuel.2010.03.018 21. Al-Hamamre Z, Yamin J. (2013) The effect of hydrogen addition on premixed laminar acetylene-hydrogen-air and ethanol-hydrogen-air flames. *Int J Hydrogen Energy* 2013. vol.38:p.7499-7509. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.03.125 22. Mustafa Koç, Yakup Sekmen, Tolga Topgu, Hu seyin Serdar Yu cesu. (2009) The effects of ethanol-unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emissions in a spark-ignition engine. *Renewable Energy*. 2009. Vol.34(10). p.2101-2106. DOI:10.1016/j.renene.2009.01.018 23. Hsieh WD, Chen RH, Wu TL, Lin TH. (2002) Engine performance and pollutant emission of an SI engine using ethanol-gasoline blended fuels. *Atmospheric Environment* 2002; vol.36(3),p.403-410. DOI: 10.1016/S1352-2310(01)00508-8 24. Abdel-Rahman AA, Osman MM. (1998) Experimental investigation on varying the

compression ratio of SI engine working under different ethanol-gasoline fuel blends. *Int J Energy Res* 1998; DOI: 10.1002/(SICI)1099-114X(199701)21:1%3C31::AID-ER235%3E3.0.CO;2-5 25. Bayraktar H. (2005) Experimental and theoretical investigation of using gasoline-ethanol blends in spark ignition engines. *Renewable Energy* 2005. vol.30. p.1733-1747. DOI: 10.1016/j.renene.2005.01.006 26. Akansu, S.; Tangöz, S.; Kahraman, N.; İlhak, M.; Açıköz, S. (2017) Experimental study of gasoline-ethanol-hydrogen blends combustion in an SI engine. *Int. J. Hydrogen Energy* 2017, 42, 25781-25790. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.07.014 27. Hawas, M.N.; Moham-med, A.A.; and Fahem, A.H. (2020). Improvement the performance and efficiency of turbocharging spark ignition engine by using blended bioethanol fuel. *Journal of Engineering Science and Technology (JESTEC)*. vol15(6). p. 3547 - 3558. URL: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85097322317&partnerID=MN8TOARS> 28. Sugita, I.W.; Syaka, D.R.B.; and Wahyudi, A.I. (2019). "Effect of Peralite-Methanol Blends on Performance and Exhaust Emission of a Four-Stroke 125 CC Motorcycle Engine". *KnE Social Sciences*, 2019. DOI:10.18502/kss.v3i12.4105.

Надійшла до редакції 14.07.2025 р.

Кравченко Сергій Сергійович - канд. техн. наук, доц., завідувач кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: kravc4enkoser@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3250-8645>.

Прохоренко Андрій Олексійович – доктор техн. наук, проф., Харків, Україна, e-mail: ap.kharkiv@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0002-5495-9626>.

Кузьменко Анатолій Петрович – канд. техн. наук, доц., доцент кафедри двигунів внутрішнього згоряння Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, Харків, Україна, e-mail: kuzmatolja@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4029-4010>

ADAPTATION OF AUTOMOBILE GASOLINE ENGINE FOR WORK ON MIXED FUEL WITH BIOETHANOL

S.S. Kravchenko, A.O. Prokhorenko, A.P. Kuzmenko

Due to the introduction in Ukraine, as of May 1, 2025, of new environmental standards mandating the inclusion of at least 5% bioethanol in gasoline with an octane number below 98, the issue of adapting used automotive gasoline engines to operate on blended fuel has become increasingly relevant. Bioethanol, as a renewable energy source, possesses different physicochemical properties compared to gasoline, which affects the combustion process and, consequently, influences the engine's power output, fuel efficiency, and environmental performance. This study analyzes the impact of bioethanol addition on fuel-air mixture parameters, particularly changes in the air-fuel equivalence ratio, calorific value, and ignition boundaries. The stoichiometric ratios of gasoline-air and bioethanol-air mixtures differ, which can disrupt the quality of the prepared combustible mixture and, subsequently, alter engine performance indicators such as power and efficiency. The reduced calorific value of the bioethanol-gasoline mixture may lead to a decrease in engine power—potentially by up to 40%. When adding 25% bioethanol to gasoline, the calorific value of the fuel-air mixture decreases by 9%, which can result in a proportional reduction in engine power. At bioethanol concentrations of 30–60%, the mixture may fall outside the ignition range, rendering it ineffective without additional technical solutions. Modern approaches to engine adaptation are reviewed, including fuel delivery correction based on ethanol content sensors and oxygen sensors in the exhaust gases (closed-loop control), followed by calculations of bioethanol concentration. It is noted that most modern engines can operate on fuel containing up to 15% ethanol without modifications. However, higher ethanol concentrations require both hardware and software upgrades, such as the installation of devices like the Digital E85 Adapter or ECU software modifications. The findings emphasize the need for both theoretical and experimental research to ensure effective engine adaptation to the new fuel standards.

Keywords: spark-ignition engine; bioethanol; physicochemical properties; adaptation; calorific value; stoichiometric ratio; flammability limits.